

УДК 53.097

П.Е. Троян, В.И. Зеленский, В.В. Каранский

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.

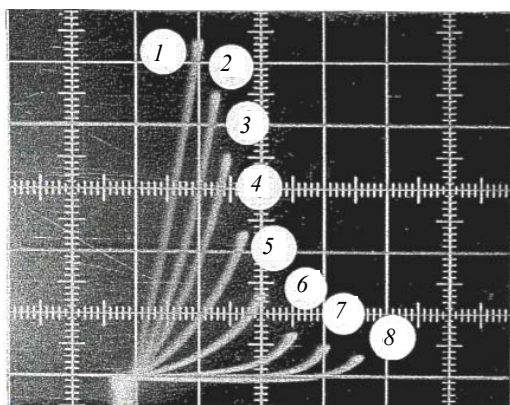
doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-4-17-20

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 – 10^7 Ом (ВС) [1–6].

Интерес к МДМ-структурам в настоящее время обусловлен наличием у них мемристорных свойств и потенциальной возможностью 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 мм^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 амплитудной приложенного напряжения V . В случае, если $V < 1$ В, вольт-амперная характеристика близка к линейной. При $V > 1$ В вольт-амперная характеристика имеет вид 1 и максимальное значение тока достигается при значении напряжения V_{\max} . 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.

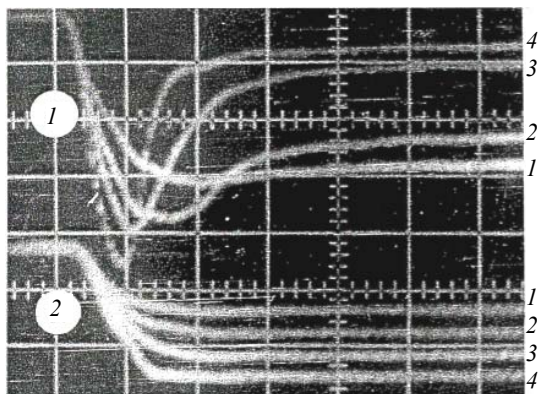
В зависимости от воздействия напряжения образец может находиться либо в состоянии ВП, либо в состоянии ВС (перед исходным состоянием). Исходное состояние образца: высокая проводимость – ВП.

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.

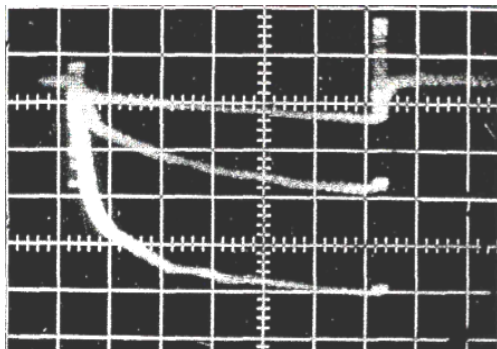


По вертикали: 25 мА/дел.; 2 – 5 В/дел.
По горизонтали: 0,25 мкс/дел.

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.

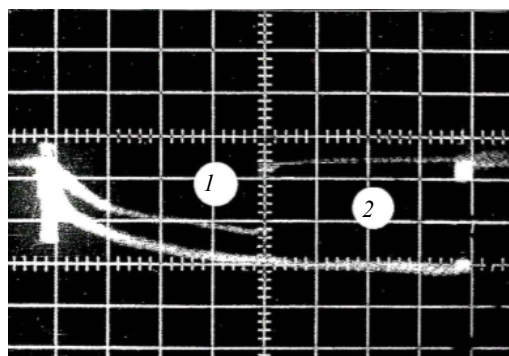
Рис. 3. Осциллограмма импульсов сквозного тока при увеличении амплитуды

При воздействии 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 напряжения, в результате воздействия которого было получено исходное состояние ВС.



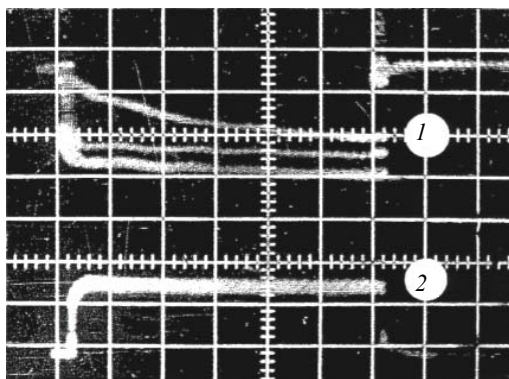
По вертикали: 2,5 мА/дел.

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.

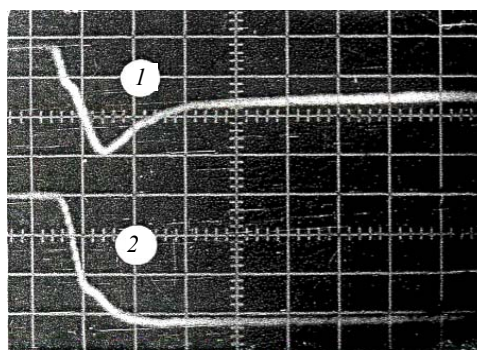
Значение проводимости образца после воздействия импульса напряжения зависит от амплитуды импульса напряжения, в результате воздействия которого было получено исходное состояние ВС.



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-структуры.

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-структуры, как эмиссия электронов в вакуум, вольт-амперная характеристика сквозного тока, определяются свойствами квантовых точек и нанозора между квантовыми точками (Si), возникающими в процессе электрической формовки, путем диссоциации слабых связей Si-OH Si-H, имеющихся в пленках SiO₂, и участком верхнего электрода (М) (рис. 8) в условиях сильного электрического поля, напряженность составляет 10^8 – 10^9 В/м при напряжении 10–15 В между электродами МДМ-структуры.

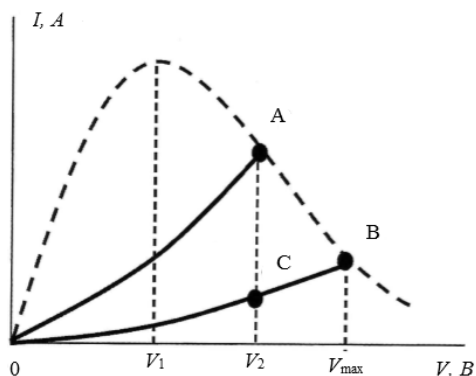


Рис. 7. Зависимость динамической вольт-амперной характеристики сквозного тока от амплитуды предшествующего импульса напряжения

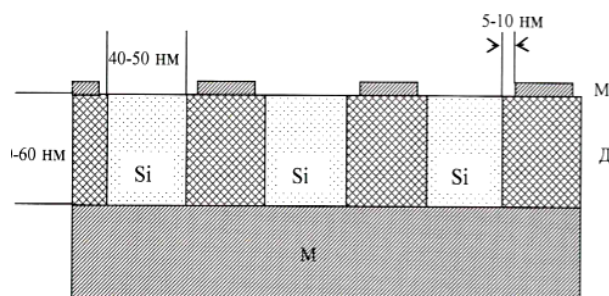


Рис. 8. Модель структуры МДМ, образующейся в результате электрической формовки [11–15]

Полученные результаты позволяют углубить знания в области процессов переключения в МДМ

структурах, 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-Si₃N₄-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. Hogarth // 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 ненакалываемых тонкопленочных эмиттеров в импульсном режиме / П.И. Антоненко, Г.А. Воробьев, В.И. Зеленский, П.Е. Троян и др. // Электронная техника. – Сер. 4: Электрорадиотехнические 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-Al₂O₃-metal structures / C. Barriac, P. Pinard, and F. Daroiné // Phys. state, 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. Dimlei Dj., Stounhem A., Mogran D. Elektricheskie yavleniya v amorfnih 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-Si₃N₄-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. Vozmozhnii mekhanizm formirovaniya N-obraznoi volt-ampernoï harakteristiki MPM diode, *JTF*, 1994, T. 64, vol. 12, pp. 88–150 (in Russ.).
5. Vorobev G.A., Troyan P.E. Elektronnie processi v tonkoplenochnih strukturah metal-dielektrik-metall, *Monografiya, Tomsk*, 2007. 180 p.
6. Pagnia H., Sotnik N. Bistable switching in electroformed 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 probai tonkoplenochnih struktur metall-dielektrik-metall. *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 tehnika (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 mikro-sistemnaya tehnika*, 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., Daroigne F. Study of the electrical properties of Al-Al₂O₃-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 probai. *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