**УДК 621.382; 004.3**

**НЕСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ МАССОПЕРЕНОСА ЗАРЯДОВ В САМОСОГЛАСОВАННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛООКСИДНОГО МЕМРИСТОРА**

*Бусыгин Александр Николаевич, к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник 1,*

*Габдулин Бауржан Хайруллович, аспирант, младший научный сотрудник 1*

*Удовиченко Сергей Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель 1*

*udotgu@mail.ru*

*Шулаев Н.А, аспирант, младший научный сотрудник 1*

*Писарев А.Д., к.т.н., доцент, старший научный сотрудник 1*

*Ибрагим А.Х.А., младший научный сотрудник 1*

*1ТюмГУ, г. Тюмень*

Аннотация: Представлена нестационарная одномерная физико-математическая модель массопереноса кислородных вакансий и захваченных электронов в самосогласованном электрическом поле, которая позволяет точнее определить влияние температуры на электрофизические свойства металлооксидного мемристора по сравнению со стационарной и нестационарной моделями в приближении постоянного поля.

Ключевые слова: мемристор на основе оксида металла, модель массопереноса зарядов, кислородные вакансии, вольт-амперная характеристика мемристора.

**Введение**

В [1] на основе достаточно полной системы уравнений массопереноса зарядов [2] представлена простая стационарная физико-математическая модель переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние. Модель [1] в отличие от [2] учитывает диффузионный член в уравнении непрерывности для концентрации вакансий кислорода, связанный с наличием градиента концентрации в оксидном слое.

В настоящей работе представлена нестационарная одномерная модель массопереноса зарядов в самосогласованном электрическом поле оксидного слоя мемристора, в которую помимо уравнений непрерывности концентрации кислородных вакансий и ионов впервые включены нестационарные уравнения непрерывности концентрации и плотности тока захваченных электронов.

**Нестационарная модель массопереноса заряда**

Система нестационарных уравнений массопереноса зарядов в самосогласованном электрическом поле оксидного слоя мемристора имеет вид:

(1)

(2)

(3)

, (4)

(5)

Уравнения для концентраций кислородных вакансий и ионов (1) и (2) взяты из [1]. Нестационарные уравнения непрерывности концентрации и плотности тока электронов (3) и (4) используются впервые. Все обозначения в этих уравнениях взяты из [1].

Численное моделирование системы уравнений (1) - (5) проведено с помощью программы на языке Python. Построена вольт-амперная характеристика (ВАХ) на участке переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние при постоянном электрическом поле, соответствующая нестационарному режиму резистивного переключения мемристора. Она расположена ближе к экспериментальной кривой, чем кривая в случае стационарного режима (рис.1). Расчётная ВАХ при самосогласованном поле расположена ещё ближе к экспериментальной кривой относительно соответствующей кривой при постоянном поле (рис.2).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.1. Зависимость тока *I* = *J*π*D2/4* от напряжения *U* на аноде, описывающая  резистивное переключение мемристора. | Рис.2. Влияние самосогласованного электрического поля на вид кривой ВАХ мемристора. |

Получены кривые ВАХ на участке переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние при различной температуре оксидного слоя.

**Выводы**

Представлена нестационарная модель массопереноса зарядов в самосогласованном электрическом поле оксидного слоя мемристора. Расчетная ВАХ расположена ближе к экспериментальной кривой по сравнению со стационарной моделью и нестационарной моделью с постоянным полем. Определено влияние температуры на распределение концентрации кислородных вакансий по толщине мемристора и вид кривой ВАХ на участке переключения мемристора из низкопроводящего в высокопроводящее состояние.

Исследование проведено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект FEWZ-2024-0020).

Список использованных источников

1. Udovichenko S., Busygin A., Ebrahim A., Bobylev A., Gubin A. 2023. Mathematical Model of Metal–Oxide Memristor Resistive Switching based on Full Physical Model of Heat and Mass Transfer of Oxygen Vacancies and Ions // Physica status solidi (a). Article 2200478. <https://doi.org/10.1002/pssa.202200478>
2. Chernov A.A., Islamov D.R., Pik’nik A.A., Perevalov T.V., Gritsenko V.A. 2017. Three-dimensional non-linear complex model of dynamic memristor switching // ECS Transactions. Vol.75. No.32. Pp. 95-104. <https://doi.org/10.1149/07532.0095>

A NON-STATIONARY MODEL OF MASS TRANSFER IN A SELF-CONSISTENT ELECTRICAL FIELD FOR DETERMINING THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF METAL OXIDE MEMRISTORS

A.N.Busygin, B.K.Gabdulin, S.Y.Udovichenko, N.A.Shulaev, A.D.Pisarev, A.H.A. Ebrahim

Abstract: A non-stationary one-dimensional physical and mathematical model of mass transfer of oxygen vacancies and trapped electrons in a self-consistent electric field is presented, this model allows to determine the influence of temperature on the electrophysical properties of metal oxide memristors.

Key words: metal oxide based memristor, physical model of charge mass transfer, oxygen vacancies and trapped electrons, current-voltage characteristic of a memristor, oxide film temperature.