

УДК 621.315.049.771.12

Моделирование времени до пробоя пористого диэлектрика в системе металлизации интегральных схем современного топологического уровня

© 2021 г. А. А. Орлов^{1,2,✉}, А. А. Резванов^{1,2}

¹ АО «НИИ молекулярной электроники»,
ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия

✉ Автор для переписки: aorlov@niime.ru

Аннотация. В работе выполняется имитационное моделирование процессов диффузии ионов металлического барьера в low-k диэлектрик между двумя близлежащими медными линиями. На основании экспериментальных данных по коэффициенту диффузии, опубликованных в научной литературе, и расчетов согласно математической модели распределения ионов металлического барьера в диэлектрике проведена оценка времени до пробоя пористого low-k диэлектрика в элементах сверхбольших интегральных схемах современного топологического уровня. Дополнительно, в работе получены зависимости времени пробоя диэлектрика от расстояния между двумя близлежащими медными линиями, а также в зависимости от напряжения питания линии (другая линия заземлена).

Ключевые слова: low-k диэлектрик, пористость, временной пробой диэлектрика, медная металлизация

Для цитирования: Орлов А.А., Резванов А.А. Моделирование времени до пробоя пористого диэлектрика в системе металлизации интегральных схем современного топологического уровня. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2021; 24(2): 102—106. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-102-106>

Simulation of the time dependent dielectric breakdown of a porous dielectric in the metallization system of integrated circuits of the modern topological level

A. A. Orlov^{1,2,✉}, A. A. Rezvanov^{1,2}

¹ Molecular Electronics Research Institute, JSC,
6–1 Acad. Valieva Str., Zelenograd, Moscow 124460, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russia

✉ Corresponding author: aorlov@niime.ru

Abstract. In this work, the simulation of the processes of diffusion of metal barrier ions into a low-k dielectric between two nearby copper lines was performed. Based on experimental data on the diffusion

coefficient published in the scientific literature and calculations according to the mathematical model of the distribution of metal barrier ions in the dielectric, the time dependent breakdown of a porous low- k dielectric in the elements of very large-scale integrated circuits of the modern topological level was estimated. Additionally, the work obtained dependences of the dielectric breakdown time on the distance between two nearby copper lines along with dependence on the supply voltage of the line (the other line is grounded).

Keywords: low- k dielectric, porosity, time dependent dielectric breakdown, copper metallization

For citation: Orlov A.A., Rezvanov A.A. Simulation of the time dependent dielectric breakdown of a porous dielectric in the metallization system of integrated circuits of the modern topological level. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(2): 102—106. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-102-106>

Введение

С постоянным уменьшением топологических норм в производстве сверхбольших интегральных схем (СБИС) и внедрением новых материалов (например, пористые SiOCH low- k диэлектрики), согласно международной дорожной карте для устройств и систем (*International Roadmap for Devices and Systems* — IRDS 2020), временной пробой диэлектрика (*Time Dependent Dielectric Breakdown* — TDDDB) является одной из основных проблем, приводящих к отказу СБИС [1]. Временной пробой диэлектрика это механизм отказа в системе металлизации, при котором пробой диэлектрика — результат длительного воздействия электрического поля.

В системе медной металлизации для технологий 90 нм и ниже основной причиной снижения надежности СБИС является диффузия и дрейф ионов меди в диэлектрик под действием внешнего электрического поля [2—5]. Но для технологий с проектными нормами 32 нм и ниже необходимо также рассматривать потенциальные токи ионов диффузионного барьера между медью и диэлектриком.

Причиной TDDDB в таком случае предполагается формирование проводящего слоя ловушек, соединяющего две близлежащие металлические линии (электрода), что впоследствии приводит к существенному увеличению тока. Считается, что ловушки (центры локализации туннелирующих электронов из электродов) формируются за счет диффузии ионов металлического барьера (например, Ta/TaN) [6]. Локальная проводимость между медными линиями определяется вероятностью прыжка электрона между ближайшими центрами, которая, в свою очередь, экспоненциально зависит от расстояния между центрами (1).

$$\sigma_{i,j} \sim \gamma_{i,j}^0 \exp \left\{ -\frac{2r_{i,j}}{a} - \frac{\epsilon_{i,j}}{k_B T} \right\}, \quad (1)$$

где $r_{i,j}$ — расстояние между i и j центрами; a — радиус локализации электронов на указанных центрах;

$\epsilon_{i,j}$ — энергетический барьер между двумя центрами; k_B — постоянная Больцмана; T — температура.

Все ловушки формируют сеть резисторов, где сопротивление $R_{i,j}$ между i и j центрами пропорционально обратной величине локальной проводимости $\sigma_{i,j}$. При этом, в двумерной системе расстояние $r_{i,j}$ определяется через концентрацию ионов металлического барьера $C(x,y,t)$ в рассматриваемом слое через выражение $r_{i,j} = C(x,y,t)^{-1/2}$ [7]. Из-за разницы в расстоянии между центрами и экспоненциальной разницы между значением сопротивления резисторов полное сопротивление проводящего пути определяется минимумом указанной концентрации (схема на рис. 1; d — расстояние между медными линиями) [8].

Целью работы является разработка математической модели распределения ионов металлического барьера в low- k диэлектрике и оценка влияния входных параметров модели на численное значение временного пробоя диэлектрика.

Моделирование временного пробоя диэлектрика

Нормированную минимальную концентрацию ионов металла $C_{\text{norm}}^{\min}$ можно определить, исходя из уравнения диффузии и дрейфа ионов в электрическом поле (2) и граничными условиями на электродах (3) [9].

$$\frac{\partial C_{\text{norm}}}{\partial t} = D \Delta C_{\text{norm}} - qDE \frac{\nabla C_{\text{norm}}}{k_B T}; \quad (2)$$

$$C_{\text{norm}}(x=0) = C_{\text{norm}}(x=d) = 1. \quad (3)$$

Представленные на рис. 2 расчеты нормированной концентрации ионов металла между двумя близлежащими медными линиями в зависимости от времени проводились в программе COMSOL Multiphysics® методом конечных элементов (значения входных параметров моделирования показаны

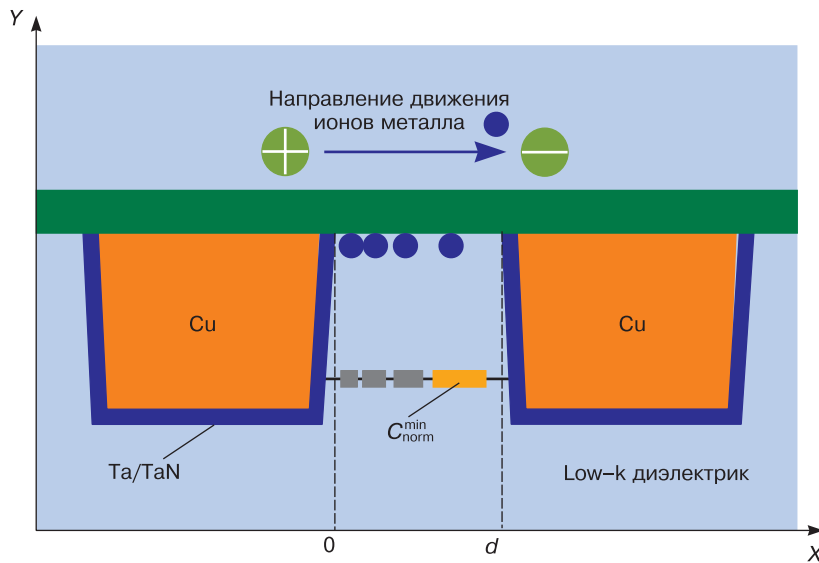


Рис. 1. Схематичное изображение физических процессов в моделируемой структуре, представляющей собой две близлежащие медные линии с диэлектриком между ними [8].

Входные параметры: T — температура; D — коэффициент диффузии атомов металла в диэлектрик; k — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; E — напряженность электрического поля в промежутке между медными линиями

Fig. 1. Schematic of physical processes in simulated structure containing two nearby copper lines separated by dielectric [8].

Input parameters: T is temperature, D is metal atom diffusion coefficient in dielectric, k is dielectric permeability of dielectric and E is electric field magnitude between copper bias lines

вверху рис. 2) [7]. Исходя из графика зависимости нормированной концентрации от времени $C_{norm}^{min}(t)$, можно определить время до пробоя диэлектрика (Time to Failure — TTF) при условии $C_{norm}^{min} \approx 1$ (область определения TTF указана на рис. 3). В данном случае значение TTF составляет примерно $1,25 \times 10^8$ с ($\approx 3,96$ лет). Аналогичные расчеты проведены для параметров, указанных в работе [10]. Получено, что значение TTF в таком случае составляет около 4 ч (входные данные указаны на рис. 4).

Требуемые входные параметры для моделирования можно получить из экспериментальных данных. В работе [11] показано, что средняя диффузионная длина ионов может быть аппроксимирована выражением $2(Dt)^{1/2}$, где D и t — коэффициент диффузии ионов в веществе и время диффузии соответственно. Далее, из аппроксимации графика Аррениуса (зависимость коэффициента диффузии D от температуры T) можно извлечь параметры D_0 и энергию активации диффузионного процесса E_a из формулы (4), используя следующую известную

связь между коэффициентом диффузии и температурой:

$$D = D_0 \exp(-E_a/k_B T). \quad (4)$$

Диффузионную длину можно определить, например, методом просвечивающей микроскопии. Также, график Аррениуса можно вычислить из полученных профилей в методе рентгеновской дифракции [11].

На рис. 5 представлена зависимость TTF от расстояния d между двумя близлежащими медными линиями при постоянных значениях коэффициента диффузии D , температуры T и диэлектрической проницаемости k . Аппроксимация полученной зависимости имеет экспоненциальный характер и описывается следующим выражением:

$$\text{TTF} = A_1 \exp\left(\frac{d}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{d}{t_2}\right) + \text{TTF}_0. \quad (5)$$

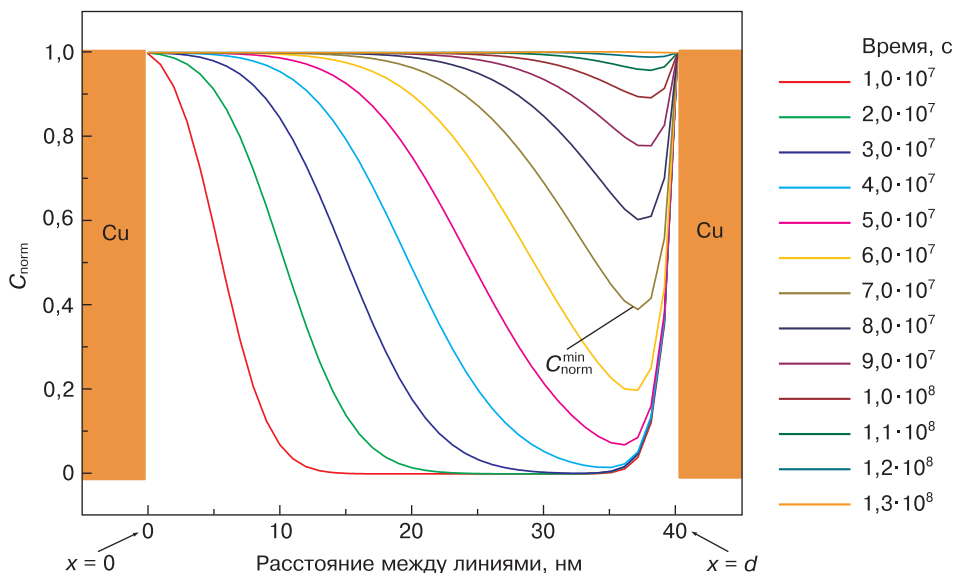


Рис. 2. Распределение концентрации ионов металлического барьера между двумя близлежащими медными линиями.

Входные параметры: $k = 2,9$; $d = 40$ nm; разность потенциалов $\Delta V = 1,1$ В; $D = D_0 \exp(-E_a/k_B T)$, где $D_0 = 2 \cdot 10^{-11}$ м²/с, энергия активации $E_a = 0,9$ эВ, $T = 333$ К

Fig. 2. Distribution of ion concentration in metallic barrier between two nearby copper lines.

Input parameters: $k = 2.9$; $d = 40$ nm; potential difference $\Delta V = 1.1$ V; $D = D_0 \exp(-E_a/k_B T)$, where $D_0 = 2 \cdot 10^{-11}$ m²/s, activation energy $E_a = 0.9$ eV and $T = 333$ K

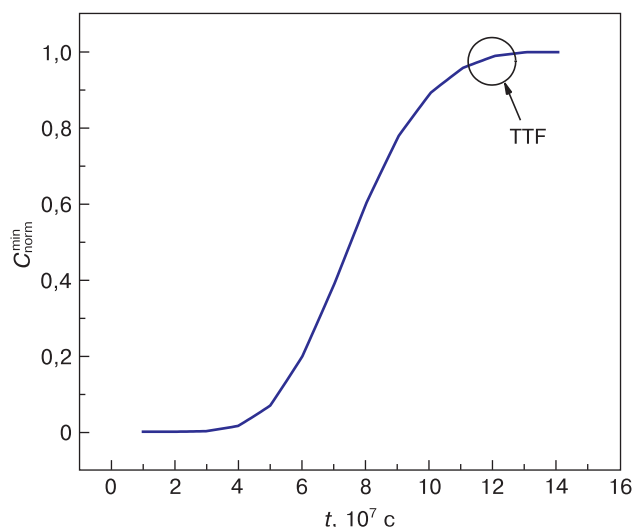


Рис. 3. Определение времени до пробоя (ТТФ) пористого диэлектрика

Fig. 3. Determination of time to failure (TTF) of porous dielectric

Для параметров, использованных в моделировании на рис. 2 [7], коэффициенты в выражении (5) имеют следующие значения: $A_1 = 3,33739$, $A_2 = 3,33739$, $t_1 = 55,8961$, $t_2 = 68,31746$, $TTF_0 = -8,66352$.

В данной работе рассматривается случай постоянной разности потенциалов между двумя линиями (или, эквивалентно, постоянное электрическое поле), который охватывает следующие случаи питания линий: линия питания — заземленная линия; линия питания — периодический сигнал; периодический сигнал — периодический сигнал. Случай заземленная линия — периодический сигнал планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях.

На рис. 6 представлена зависимость ТТФ от напряжения питания линии V_{DD} (другая линия заземлена) при постоянных значениях коэффициента диффузии D , температуры T и диэлектрической проницаемости k .

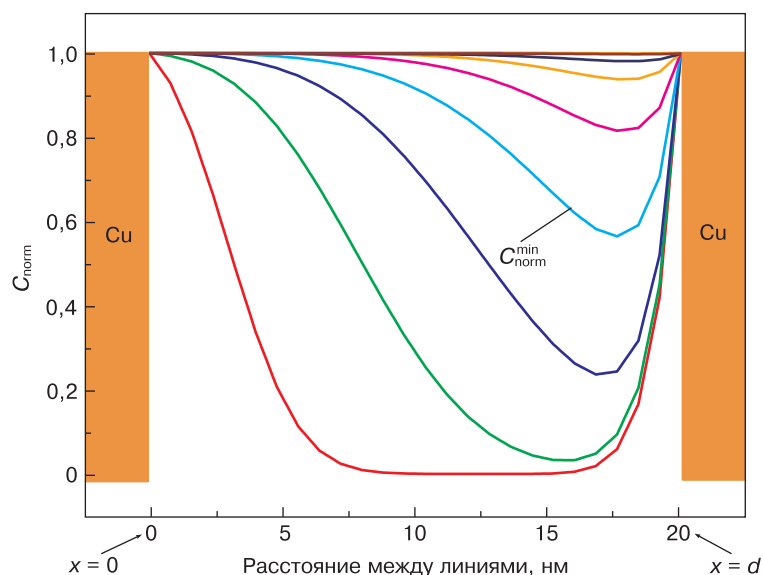


Рис. 4. Распределение концентрации ионов металлического барьера между двумя близлежащими медными линиями.

Входные параметры: $k = 2,3$; $d = 20$ нм; разность потенциалов $\Delta V = 1,1$ В; $D = 5,1 \cdot 10^{-20}$ м²/с; $T = 673$ К

Fig. 4. Distribution of ion concentration in metallic barrier between two nearby copper lines.

Input parameters: $k = 2.3$; $d = 20$ nm; potential difference $\Delta V = 1.1$ V; $D = 5.1 \cdot 10^{-20}$ m²/s; $T = 673$ K

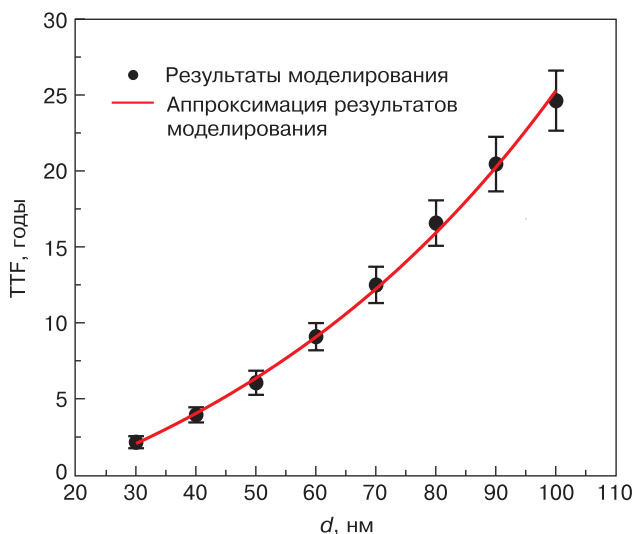


Рис. 5. Зависимость ТТФ от расстояния между линиями (при постоянных значениях D , T и k)

Fig. 5. TTF as a function of distance between copper lines (at constant D , T and k)

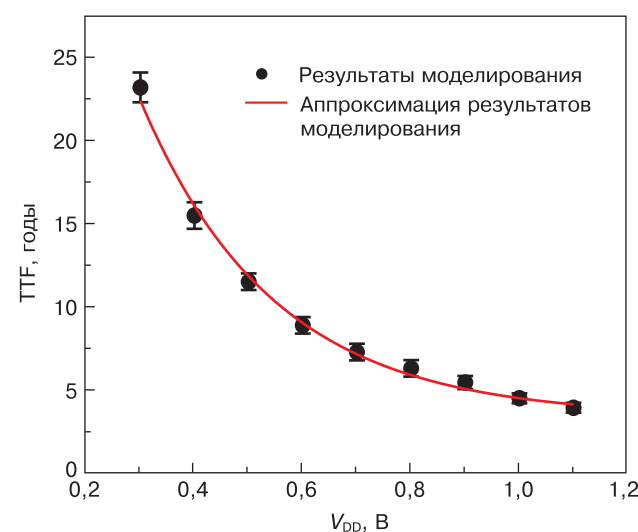


Рис. 6. Зависимость ТТФ от напряжения питания линии V_{DD} (другая линия заземлена) при постоянных значениях D , T и k

Fig. 6. TTF as a function of power voltage V_{DD} (the other bias line being earthed) at constant D , T and k

Аппроксимация полученной зависимости имеет также экспоненциальный характер и описывается следующим выражением:

$$TTF = A_1 \exp\left(\frac{V_{DD}}{t_1}\right) + TTF_0. \quad (6)$$

Для параметров, использованных в моделировании на рис. 2 [7], коэффициенты в выражении (6) имеют следующие значения: $A_1 = 67,11307$, $t_1 = -0,24943$, $TTF_0 = 3,17971$.

Закключение

Таким образом, в работе представлен метод оценки времени до пробоя пористого диэлектрика в элементах СБИС на основании извлечения из экспериментальных данных коэффициента диффузии и расчетов по математической модели распределения ионов металлического барьера в диэлектрике между двумя близлежащими медными линиями. Дополнительно, в работе произведены расчеты зависимости TTF от расстояния между двумя близлежащими медными линиями, а также в зависимости от напряжения питания линии (другая линия заземлена). Получено, что указанные зависимости носят экспоненциальный характер. В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть изменение TTF при подаче периодического сигнала на линию (другая линия заземлена), а также зависимость TTF от геометрии топологии интегральной схемы.

Библиографический список / References

1. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) Interconnect. 2020. <https://irds.ieee.org/editions/2020>
2. Gonella R. Key reliability issues for copper integration in damascene architecture. *Microelectronic Engineering*. 2001; 55(1–4): 245–255. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317-\(00\)00454-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9317-(00)00454-8)

Информация об авторах / Information about the authors

Орлов Андрей Алексеевич — младший научный сотрудник, АО «НИИ молекулярной электроники», ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия; e-mail: orlov.aa@phystech.edu

Резванов Аскар Анварович — канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории, АО «НИИ молекулярной электроники», ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия; Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-9122>; e-mail: arezvanov@niime.ru

3. Lloyd J.R., Murray C.E., Ponoth S., Cohen S., Liniger E. The effect of Cu diffusion on the TDDDB behavior in a low-k interlevel dielectrics. *Microelectronics Reliability*. 2006; 46(9–11): 1643–1647. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2006.08.003>

4. Chen F., Bravo O., Chanda K., McLaughlin P., Sullivan T., Gill J., Lloyd J., Kontra R., Aitken J. A comprehensive study of low-k SiCOH TDDDB phenomena and its reliability lifetime model development. In: *Proc. of the Intern. Reliability Physics Symposium*. 26–30, March 2006. New York: IEEE; 2006. P. 46–53. <https://doi.org/10.1109/RELPHY.2006.251190>

5. Suzumura N., Yamamoto S., Kodama D., Makabe K., Komori J., Murakami E., Maegawa S., Kubota K. A new TDDDB degradation model based on Cu ion drift in Cu interconnect dielectrics. In: *Proc. of the Intern. Reliability Physics Symposium*. 26–30, March 2006. New York: IEEE; 2006. P. 484–489. <https://doi.org/10.1109/RELPHY.2006.251266>

6. Tan T.L., Gan C.L., Du A.Y., Cheng C.K. Effect of Ta migration from sidewall barrier on leakage current in Cu/SiOCH low-k dielectrics. *Journal of Applied Physics*. 2009; 106(4): 043517. <https://doi.org/10.1063/1.3202387>

7. Huang X., Sukharev V., Qi Z.-D., Kim T.-Y., Tan S. X.-D. Physics-based full-chip TDDDB assessment for BEOL interconnects. In: *Proc. of the 53rd Annual Design Automation Conference 2016 – DAC '16*. 05–09, June 2016. Austin, USA: IEEE; 2016. <https://doi.org/10.1145/2897937.2898062>

8. Валеев А.С., Красников Г.Я. Технология изготовления внутрикристалльных и межкристалльных межсоединений современных СБИС (обзор, концепция развития). *Микроэлектроника*. 2015; 44(3): 180–201. <https://doi.org/10.7868/S0544126915030084>

Valeev A.S., Krasnikov G.Yu. Manufacturing technology of intra- and interchip interconnects for modern ULSIs: Review and concepts of development. *Russian Microelectronics*. 2015; 44(3): 154–172. <https://doi.org/10.1134/S1063739715030087>

9. Groove A.S. *Physics and Technology of Semiconductor Devices*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 1967.

10. Yang L.Y., Zhang D.H., Li C.Y., Liu R., Wee A.T.S., Foo P.D. Characterization of Cu/Ta/ultra low-k porous polymer structures for multilevel interconnects. *Thin Solid Films*. 2004; 462–463: 182–185. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2004.05.071>

11. Kuo Y.-L., Lee H.-H., Lee C., Lin J.-C., Shue S.-L., Liang M.-S., Daniels B.J. Diffusion of copper in titanium zirconium nitride thin films. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2004; 7(3): C35–C37. <https://doi.org/10.1149/1.1644355>

Andrey A. Orlov — Junior Researcher, Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6–1 Acad. Valieva Str., Zelenograd, Moscow 124460, Russia; Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russia; e-mail: orlov.aa@phystech.edu

Askar A. Rezvanov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory, Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6–1 Acad. Valieva Str., Zelenograd, Moscow 124460, Russia; Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-9122>; e-mail: arezvanov@niime.ru