

УДК 621.3.049.771.12

Учет пористости материала в модели временного пробоя диэлектрика в системе металлизации интегральных схем

© 2021 г. А. А. Орлов^{1,2,✉}, Е. А. Ганыкина^{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: orlov.aa@phystech.edu

Аннотация. В работе выполнено имитационное моделирование процессов диффузии ионов меди в low-k диэлектрик между двумя близлежащими медными линиями. Получено, что увеличение времени диффузии иона в материале с пористостью 30 %, радиусом пор 1 нм (для входных параметров, указанных в статье) за счет увеличения диффузионного пути можно оценить в 16 %. При этом совместный учет эффекта увеличения электрического поля на краях пор и уменьшения энергии активации диффузии приводит к уменьшению времени до пробоя на 26 % относительно плотного материала.

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

Для цитирования: Орлов А.А., Ганыкина Е.А., Резванов А.А. Учет пористости материала в модели временного пробоя диэлектрика в системе металлизации интегральных схем. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2021; 24(4): 242—247. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-4-242-247>

Accounting of the porosity of the material in the simulation of the time-dependent dielectric breakdown in the metallization system of integrated circuits

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

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

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

✉ Corresponding author: orlov.aa@phystech.edu

Abstract. In this work, simulation modeling of processes of the diffusion of copper ions in low-k dielectric between two neighboring copper lines is performed. It was found that an increase in

the diffusion time of an ion in a material with a porosity of 30% and a pore radius of 1 nm (for the input parameters specified in the work) due to an increase in the diffusion path can be estimated at 16%. Moreover, the combined consideration of the effect of an increase in the electric field at the edges of the pores and a decrease in the diffusion activation energy leads to a decrease in the time to breakdown by 26% relatively dense material.

Keywords: low- k dielectric, porosity, TDDDB

For citation: Orlov A.A., Ganykina E.A., Rezvanov A.A. Accounting of the porosity of the material in the simulation of the time-dependent dielectric breakdown in the metallization system of integrated circuits. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(4): 242–247. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-4-242-247>

Введение

Временной пробой диэлектрика (*Time-Dependent Dielectric Breakdown* — **TDDDB**), согласно международной дорожной карте для устройств и систем (*International Roadmap for Devices and Systems* — IRDS 2020), является одной из основных проблем, приводящих к отказу сверхбольших интегральных схем (**СБИС**) [1]. В системе медной металлизации для технологий 90 нм и ниже основной причиной снижения надежности СБИС являются диффузия и дрейф ионов меди в low- k диэлектрик (пористый OSG — диоксид кремния SiO_2 , в матрице которого часть связей $\text{Si}-\text{O}$ замещена связями $\text{Si}-\text{CH}_3$ и добавлена искусственная пористость [2]) под действием внешнего электрического поля [3, 4]. Для технологий с проектными нормами 32 нм и ниже обычно рассматривается временной пробой диэлектрика между двумя близлежащими металлическими линиями (*Intermetal Dielectric* — **IMD**), так как толщина IMD значительно меньше, чем толщина диэлектрика, разделяющего уровни системы металлизации.

Стоит отметить, что временной пробой диэлектрика устанавливает ограничение на минимальное пространство между соседними линиями для определенного low- k материала, вызывая замедление масштабирования значения диэлектрической проницаемости.

Описание модели расчета временного пробоя пористого low- k диэлектрика

Одной из перспективных моделей для оценки времени до пробоя пористого low- k диэлектрика является модель, основанная на расчете изменения концентрации ионов металла на границе межслой-

ный диэлектрик/low- k диэлектрик [5, 6]. Причиной TDDDB в этой модели полагается формирование проводящего слоя ловушек, соединяющего близлежащие металлические линии, что впоследствии приводит к существенному увеличению тока. Ловушки являются центрами локализации туннелирующих электронов из электродов, и расстояние между ними определяется как $r_{i,j} = C(x,y,t)^{-1/2}$ [6]. Таким образом, наибольшее расстояние между ловушками соответствует минимальной концентрации ионов меди (C^{\min}) в слое диэлектрика. Пробой происходит в области максимального расстояния между ловушками при достижении C^{\min} некоего порогового значения (например, величины предельной растворимости ионов меди в диэлектрике).

Основными недостатками описанной в указанных работах модели являются отсутствие явного учета пористости и размера пор low- k диэлектрика в диффузионно-дрейфовом уравнении движения ионов металла в материале, а также ограниченный температурный диапазон. Далее в работе будут рассмотрены положения, позволяющие ввести в указанную модель параметры пористости low- k диэлектрика.

Расчет временного пробоя пористого low- k диэлектрика

Схематичное изображение моделируемой 2D системы представлено на рис. 1 (требуемые входные параметры для расчета времени до пробоя представлены вверху рисунка; рассматривается движение ионов меди только в слое диэлектрика).

Нормированную (на величину растворимости ионов меди в диэлектрике) минимальную концентрацию ионов C_{norm}^{\min} можно определить, исходя из уравнения диффузии и дрейфа ионов меди

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на III-й международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 25–27 октября 2021 г.

© 2021 National University of Science and Technology MISiS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

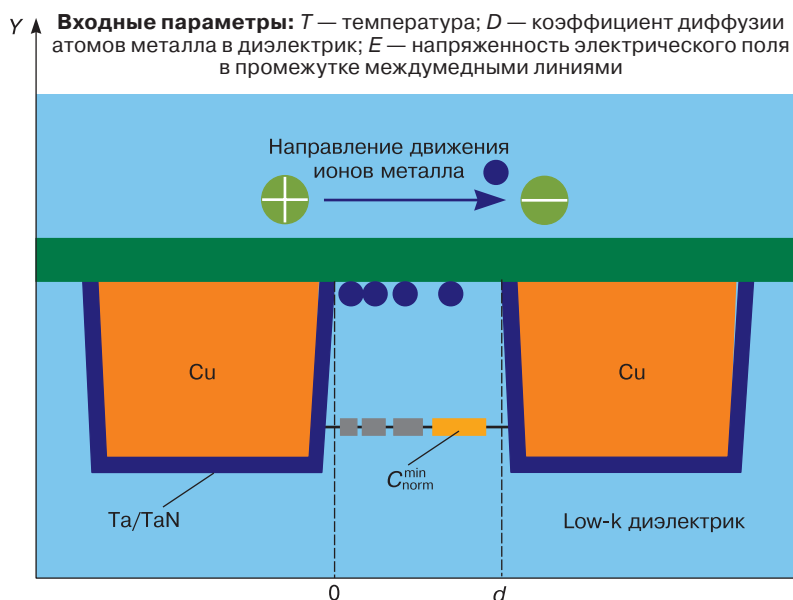


Рис. 1. Схематичное изображение моделируемой 2D системы (требуемые входные параметры модели указаны сверху рисунка)

Fig. 1. Schematic representation of the simulated 2D system (the required model input parameters are indicated at the top of the figure)

в электрическом поле (1) и граничными условиями на электродах (2) [7].

$$\frac{\partial C_{\text{norm}}}{\partial t} = D \Delta C_{\text{norm}} - qDE \frac{\nabla C_{\text{norm}}}{k_B T}; \quad (1)$$

$$C_{\text{norm}}(x=0) = C_{\text{norm}}(x=d) = 1, \quad (2)$$

Для расчета изменения входных параметров в модели оценки времени до пробоя диэлектрика при

введении пористости в качестве плотного материала будет рассмотрен диоксид кремния SiO_2 . Предположим, что введение пористости в плотный SiO_2 будет имитировать пористый OSG low-k диэлектрик. Данное приближение в отношении пористого OSG low-k диэлектрика обусловлено тем, что метильные CH_3 группы преимущественно расположены на стенках пор. Дополнительно, не рассматривается движение ионов меди внутри пор. В упрощенной модели, под

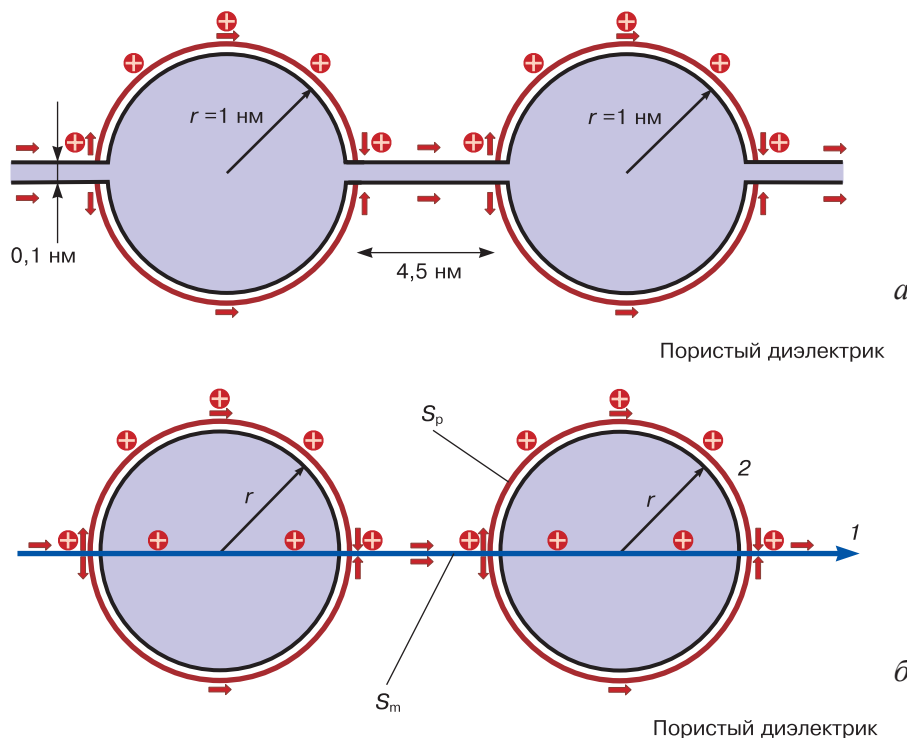


Рис. 2. Изменение диффузионного пути иона меди в материале диэлектрика с введением пористости:

a — без учета наличия соединений между порами; b — с учетом соединений между порами (синяя стрелка (1) — диффузионный путь иона в материале без пор; красные стрелки (2) — направление движение иона в присутствии пористости)

Fig. 2. Change in the diffusion path of the copper ion in the dielectric material with the introduction of porosity: a — without taking into account the presence of connections between the pores; b — taking into account connections between pores (blue arrow (1) is diffusion path of an ion in a material without pores; red arrows (2) is direction of ion movement in the presence of porosity)

порами мы будем понимать сферы, имеющие постоянный радиус, и их соединения между собой, заполненные воздухом. В качестве факторов, влияющих на изменение времени до пробоя диэлектрика с введением пористости, рассматриваются следующие предположения, указанные далее.

С введением пористости в материал диффузионный путь иона увеличивается в $\pi/2$ раз, так как вместо расстояния $2r$ (диаметр поры, где r — радиус поры) ему необходимо пройти расстояние πr (половину длины дуги поры). Пояснения представлены на рис. 2.

Полный диффузионный путь L^* иона в материале пористого диэлектрика можно представить следующим образом:

$$L^* = VS_p + (1 - V)S_m, \quad (3)$$

где V — значение пористости материала; S_p — часть диффузионного пути на краях пор; S_m — часть диффузионного пути в материале (см. рис. 2, а).

Таким образом, диффузионный путь иона в материале с пористостью 30 % и радиусом пор 1 нм относительно диффузионного пути L в непористом диэлектрике равен:

$$L^* = 0,3 \frac{\pi}{2} L + 0,7L = 1,17L. \quad (4)$$

Дополнительно, в предположении, что при величине пористости $V \approx 30\%$ и радиусе пор 1 нм геометрические размеры соединения можно примерно оценить как $0,1 \times 4,5 \text{ нм}^2$ увеличение диффузионного пути (с учетом поправки на сглаженность траектории движения иона меди) составляет (см. рис. 2, б):

$$L^* = 0,28 \frac{\pi - 0,6}{2} L + 0,72L = 1,08L. \quad (5)$$

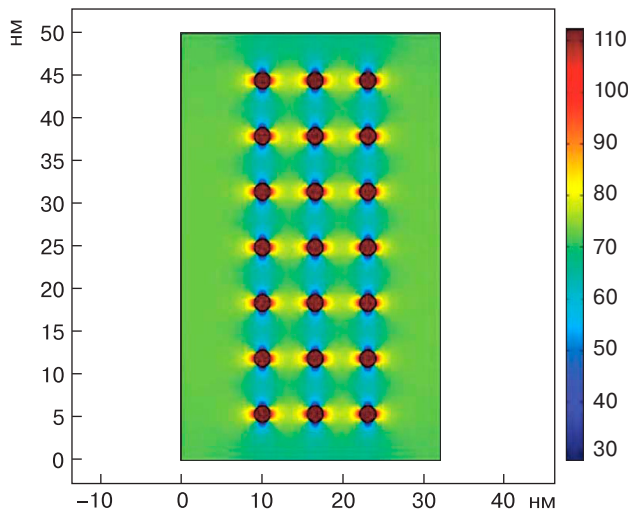


Рис. 3. Распределение электрического поля в материале SiO_2 с пористостью 30 %, радиусом пор 1 нм и приложенной разностью потенциалов 3,63 В при толщине 50 нм

Fig. 3. Distribution of the electric field in a SiO_2 material with a porosity of 30%, a pore radius of 1 nm and an applied potential difference of 3.63 V at a thickness of 50 nm

При введении пористости в материал происходит увеличение напряженности внешнего электрического поля на краях пор относительно величины поля в плотном материале. На рис. 3 приведено моделирование распределения электрического поля в материале SiO_2 с пористостью 30 %, радиусом пор 1 нм и приложенной разностью потенциалов 3,63 В при толщине 50 нм.

Из рис. 3 видно, что области повышенного электрического на краях пор для материала с пористостью 30 % и радиусом пор 1 нм не перекрываются. Исходя из расчетов, также получено, что область краевого эффекта (область движения иона меди в повышенном электрическом поле) для пор размера порядка единиц нанометров составляет примерно 40 % от половины длины окружности поры.

Заключительным фактором, связанным с введением пористости в материал, рассматривается понижение энергии активации диффузии ионов меди за счет внешнего электрического поля. В работе [8] показано, что величина энергии активации диффузии ионов меди в SiO_2 уменьшается в направлении поля и определяется выражением:

$$E_a^* = E_a - \frac{qbE}{2}, \quad (6)$$

где E_a^* — величина энергии активации диффузии в присутствии внешнего поля; q — заряд иона меди; b — величина диффузионного прыжка из одной потенциальной ямы в соседнюю яму (2,2 нм [8]).

В итоге, выражение для расчета коэффициента диффузии с поправкой на изменение энергии активации во внешнем электрическом поле принимает следующий вид:

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{E_a - \frac{qbE}{2}}{k_B T} \right). \quad (7)$$

Моделирование проводилось в программе COMSOL Multiphysics® методом конечных элементов (процесс расчета подробно описан в [5, 6]) со следующими входными параметрами: $V = 30\%$, $r = 1 \text{ нм}$, разность потенциалов 3,63 В, температура 398 К, энергия активации 0,93 эВ [9], множитель перед экспонентой в законе Аррениуса для коэффициента диффузии $1,68 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ [10], расстояние между линиями 50 нм.

Получено, что увеличение времени диффузии иона в материале (с учетом квадратичной зависимости времени диффузии от диффузионной длины [11]) за счет увеличения диффузионного пути можно оценить в 16 %, а совместный учет эффекта увеличения электрического поля на краях пор и уменьшения энергии активации диффузии приводит к уменьшению времени до пробоя на 26 % относительно плотного материала.

Закключение

Проведены оценки влияния явного учета пористости материала на численное значение временного пробоя low- k диэлектрика ионами меди. Получено, что увеличение времени диффузии иона в материале с пористостью 30 %, радиусом пор 1 нм за счет увеличения диффузионного пути можно оценить

в 16 %, а совместный учет эффекта увеличения электрического поля на краях пор и уменьшения энергии активации диффузии приводит к уменьшению времени до пробоя на 26% относительно плотного материала. В дальнейшем планируется провести калибровку полученных результатов на экспериментальных структурах.

Библиографический список

1. International technology roadmap for semiconductors (ITRSTM) interconnect. 2020 Edition. <https://irds.ieee.org/editions/2020>
2. Maex K., Shamiryan D., Iacopi F., Brongersma S.H., Baklanov M.R., Yanovitskaya Z.S. Low dielectric constant materials for microelectronics. *Journal of Applied Physics*. 2003; 93(11): 8793—8841. <https://doi.org/10.1063/1.1567460>
3. Lloyd J.R., Murray C.E., Ponoth S., Cohen S., Linienger 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. Патент (РФ) № 2486632 С2, МПК H01L 21/768. Валеев А.С., Красников Г.Я., Гвоздев В.А. Способ изготовления усовершенствованной многоуровневой медной металлизации с применением диэлектриков с очень низкой диэлектрической постоянной (ultra low- k). Заявл.: 20.07.2011; опублик.: 27.06.2013. https://yandex.ru/patents/doc/RU2486632C2_20130627
5. Huang X., Sukharev V., Qi Z., Kim T., Tan S.X.-D. Physics-based full-chip TDDDB assessment for BEOL interconnects. In: *Proc. of the 53rd Annual Design Automation Conf. (DAC'16)*. 5 June 2016; 45: 1—6. <https://doi.org/10.1145/2897937.2898062>
6. Peng S., Zhou H., Kim T., Chen H.-B., Tan S. Physics-based compact TDDDB models for low- k beol copper interconnects with time-varying voltage stressing. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2018; 26(2): 239—248. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2017.2764880>
7. Groove A.S. Physics and technology of semiconductor devices. NY, USA: Wiley & Sons Inc.; 1991. 388 p.
8. Hwang S.-S., Jung S.-Y., Joo Y.-C. The electric field dependence of Cu migration induced dielectric failure in interlayer dielectric for integrated circuits. *Journal of Applied Physics*. 2007; 101(7): 074501. <https://doi.org/10.1063/1.2714668>
9. Achanta R.S., Gill W.N., Plawsky J.L. Predicting the lifetime of copper/barrier/dielectric systems: Insights for designing better barriers for reducing copper ion drift/diffusion into the dielectric. *Journal of Applied Physics*. 2009; 106(7): 074906. <https://doi.org/10.1063/1.3238517>
10. Shacham-Diamand Y., Dedhia A., Hoffstetter D., Oldham W.G. Copper transport in thermal SiO₂. *Journal of the Electrochemical Society*. 1993; 140(8): 2427—2432. <https://doi.org/10.1149/1.2220837>
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>

References

1. International technology roadmap for semiconductors (ITRSTM) interconnect. 2020 Edition. <https://irds.ieee.org/editions/2020>
2. Maex K., Shamiryan D., Iacopi F., Brongersma S.H., Baklanov M.R., Yanovitskaya Z.S. Low dielectric constant materials for microelectronics. *Journal of Applied Physics*. 2003; 93(11): 8793—8841. <https://doi.org/10.1063/1.1567460>
3. Lloyd J.R., Murray C.E., Ponoth S., Cohen S., Linienger 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. Patent (RU) No. 2486632 C2, IPC H01L 21/768. Valeev A.S., Krasnikov G.J., Gvozdev V.A. Method for manufacturing of improved multilevel copper metallisation using dielectrics with ultra low dielectric constant (ultra low- k). Appl.: 20.07.2011; publ.: 27.06.2013. (In Russ.). https://yandex.ru/patents/doc/RU2486632C2_201306275
5. Huang X., Sukharev V., Qi Z., Kim T., Tan S.X.-D. Physics-based full-chip TDDDB assessment for BEOL interconnects. In: *Proc. of the 53rd Annual Design Automation Conf. (DAC'16)*. June 5, 2016; (45): 1—6. <https://doi.org/10.1145/2897937.2898062>
6. Peng S., Zhou H., Kim T., Chen H.-B., Tan S. Physics-based compact TDDDB models for low- k beol copper interconnects with time-varying voltage stressing. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2018; 26(2): 239—248. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2017.2764880>
7. Groove A.S. Physics and technology of semiconductor devices. NY, USA: Wiley & Sons Inc.; 1999. 388 p.
8. Hwang S.-S., Jung S.-Y., Joo Y.-C. The electric field dependence of Cu migration induced dielectric failure in interlayer dielectric for integrated circuits. *Journal of Applied Physics*. 2007; 101(7): 074501. <https://doi.org/10.1063/1.2714668>
9. Achanta R.S., Gill W.N., Plawsky J.L. Predicting the lifetime of copper/barrier/dielectric systems: Insights for designing better barriers for reducing copper ion drift/diffusion into the dielectric. *Journal of Applied Physics*. 2009; 106(7): 074906. <https://doi.org/10.1063/1.3238517>
10. Shacham-Diamand Y., Dedhia A., Hoffstetter D., Oldham W.G. Copper transport in thermal SiO₂. *Journal of the Electrochemical Society*. 1993; 140(8): 2427—2432. <https://doi.org/10.1149/1.2220837>
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>

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: aorlov@niime.ru

Ганыкина Екатерина Андреевна — 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: eganykina@niime.ru

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; <https://orcid.org/0000-0002-1677-9122>; e-mail: arezvanov@niime.ru

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

Ekaterina A. Ganykina — Researcher; Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6–1 Acad. Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia; Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; e-mail: eganykina@niime.ru

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

Поступила в редакцию 24.12.2021; поступила после доработки 12.01.2022; принята к публикации 28.01.2022
Received 24 December 2021; Revised 12 January 2022; Accepted 28 January 2022