

УДК 621.382.2/.3:621.382.032.27

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЫЖИВАЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Л.А. Борыняк<sup>1</sup>, А.П. Чернышев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

Электромагнитное излучение используется в технологических установках и при проведении боевых операций. Электромагнитный импульс известен как один из поражающих факторов, наносящих существенный урон электронному оборудованию противника. Моделирование результатов воздействия электромагнитного импульса на элементы микроэлектроники является актуальной задачей, поскольку позволяет разрабатывать радиоэлектронное оборудование с повышенной стойкостью к воздействию этого вида электромагнитного излучения. Основной механизм повреждения полупроводниковых приборов связан с местным нагревом материалов. С переходом элементной базы радиоэлектроники в нанодиапазон характерных размеров возрастает деструктивная роль диффузионных процессов, протекающих при сравнительно небольших температурах. Предложена методика оценки выживаемости элементов микроэлектроники при тепловом воздействии. Методика основана на учете зависимости коэффициента диффузии от характерного размера элементов микроэлектроники. Показано, что в нанодиапазоне характерных размеров значительно ускоряются диффузионные процессы. Проверка адекватности модели проведена путем оценки стойкости к тепловому воздействию диффузионного барьера Ta–Cu и сопоставления полученных результатов с экспериментальными данными. Проведена оценка стойкости к воздействию электромагнитного импульса элементов микроэлектроники, изготовленных из новых материалов. Установлено, что перспективные материалы для изготовления элементов микроэлектроники военного назначения должны обладать сравнительно высокой температурой плавления, низкой диффузионной подвижностью и слабой зависимостью физических свойств от температуры. Показано, что к перспективным материалам относятся графен и его производные.

*Ключевые слова:* элементы микроэлектроники, тепловое воздействие, оценка выживаемости, диффузионные барьеры, графен.

### Введение

Электромагнитное оружие, стоящее на вооружении армий развитых стран, широко используется в современных локальных конфликтах. Моделирование результатов воздействия этого вида оружия на элементы микроэлектроники является актуальной задачей, поскольку, с одной стороны, позволяет разрабатывать радиоэлектронное оборудование с повышенной стойкостью к воздействию электромагнитного импульса, с другой стороны, позволяет оценить надежность этого оборудования в условиях боевых действий. Воздействующие на элементы микросхем электромагнитные импульсы могут иметь различную форму, разную мощность и длительность, поэтому при электромагнитном воздействии выделяется различная энергия.

При анализе устойчивости элементной базы к воздействию электромагнитного импульса обычно определяют минимальную энергию, необходимую для повреждения элементов, деградации их или иных способов нарушения рабочих функ-

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.В37.21.0333 от 26 июля 2012 г.

ций. Кроме того, используют такие параметры, как максимальная мощность, ток и напряжение. Наиболее полно эти параметры для различных элементов приведены в [1]. Многие элементы полупроводниковых устройств имеют слоистую структуру, причем толщина слоев может составлять от сотен до нескольких нанометров. Полупроводниковые приборы особенно уязвимы к воздействию электромагнитного импульса по питающим и информационным цепям. Основным механизмом повреждения этих приборов связан с местным нагревом материалов. С переходом элементной базы радиоэлектроники в нанодиапазон характерных размеров возрастает деструктивная роль диффузионных процессов, протекающих при сравнительно небольших температурах. В настоящей статье разработана методика оценки выживаемости элементной базы радиоэлектронных устройств при тепловом воздействии.

### 1. Особенности диффузионных процессов в нанодиапазоне характерных размеров

С уменьшением характерных размеров элементов микроэлектроники изготовление диффузионных барьеров и проводящих соединений в диапазоне наноразмеров становится все более актуальной задачей. Значительные усилия направлены на предотвращение взаимной диффузии между электродом и его барьерным слоем, предотвращающим диффузию. Такой барьерный слой должен обеспечивать сохранение формы и размеров электрода в процессе эксплуатации элементов микроэлектронной схемы. Барьерные слои изготавливают из металлов, которые не смешиваются с материалом электродов. Например, для медных электродов в качестве диффузионных барьеров подходят тантал и вольфрам.

Нами ранее в работе [2] была теоретически рассмотрена зависимость коэффициента диффузии от характерного размера нанобъекта и воздействия гидростатического давления на нанобъект. Зависимость коэффициента самодиффузии от характерного размера нанобъекта имеет вид

$$D(T, \chi) = D_0 \exp(-\Delta H_a(\chi)/(RT)), \quad (1)$$

здесь  $\Delta H_a$  – энтальпия активации,  $\chi = r/r_0$  – приведенный характерный размер элемента микроэлектронного устройства,  $r$  – характерный размер этого элемента микроэлектроники,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура. Для соединительных нанопроводов и квантовых точек  $r$  – это радиус их сечения. Для тонких пленок величина  $r$  равна половине толщины пленки. Величина  $r_0$  определяется соотношением  $r_0 = (3-d)h$ , где  $d$  – размерность нанобъекта:  $d = 0, 1$  и  $2$  для квантовых точек, нанопроводов и тонких пленок соответственно. Здесь  $h$  – атомный диаметр. В принятых обозначениях  $D(T, \infty)$  – коэффициент диффузии в обычных («макроскопических») материалах. Примем, что зависимостью предэкспоненциального множителя  $D_0$  от  $\chi$  можно пренебречь по сравнению с экспоненциальной зависимостью (1). Энтальпия активации имеет вид

$$\Delta H_a(\chi) = \Delta H_a(\infty) \left(1 - (\chi - 1)^{-1}\right) \exp[-(\alpha - 1)/(\chi - 1)], \quad (2)$$

где  $\Delta H_a(\infty)$  – энтальпия активации самодиффузии в обычных материалах, аналогичных нанобъекту по кристаллической структуре и химическому составу;  $\alpha = \sigma_s^2/\sigma_v^2$ ,  $\sigma_s^2$  и  $\sigma_v^2$  – среднеквадратические смещения поверхностных и объемных атомов нанобъекта. Здесь и ниже под нанобъектом подразумевается нано-

структурный элемент радиотехнического устройства, имеющий хотя бы один характерный размер меньше 100 нм. Коэффициент  $\alpha$  зависит от структуры и химического состава самого нанобъекта [3]:

$$\alpha = \frac{2S_m}{3R} + 1. \quad (3)$$

Здесь  $S_m$  – энтропия плавления.

Как правило, элементы микроэлектроники находятся в матрице или окружены каким-либо диффузионным барьером, поэтому следует рассматривать взаимную диффузию вместо самодиффузии. Чтобы оценить коэффициент взаимной диффузии ( $D$ ) между химическими элементами (компонентами), составляющими нанобъект и матрицу, обычно используют соотношение Даркена  $D = xD_1 + (1-x)D_2$ . Здесь  $D_1$  и  $D_2$  – это коэффициенты самодиффузии внутри нанобъекта и внутри матрицы,  $(1-x)$  и  $x$  – это мольные доли первого и второго компонентов соответственно. В бинарном сплаве при постоянных коэффициентах диффузии  $D_i$  второй закон Фика имеет вид

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}, \quad (4)$$

здесь принято, что диффузия идет вдоль оси  $x$  и коэффициент диффузии не зависит от концентрации диффундирующего вещества. Геометрическая модель, которая обычно используется для описания диффузии в нанобъектах, представляет собой тонкую пленку с центром при  $x = 0$ , окруженную матрицей из другого вещества. Решение уравнения (4) в принятых предположениях имеет вид [4]

$$C_i(x, t) = \frac{C_0}{2\sqrt{\pi D_i t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_i t}\right), \quad (5)$$

где  $C_0$  – концентрация диффундирующего вещества в начальный момент времени (при  $t = 0$ ) в начале координат, а начальное распределение описывается дельта-функцией.

## 2. Методика расчета

В более общем случае следует учитывать конечную толщину тонкой пленки  $w$ , или радиус нанопровода  $r$ . Рассмотрим тонкую пленку, расположенную как показано на рис. 1. В этом случае выражение (5) выступает в роли функции Грина, а решение имеет вид

$$C_i(x, L) = \frac{C_0}{L\sqrt{\pi}} \int_{-w}^0 \exp\left[-(x-\xi)^2/L^2\right] d\xi = \frac{C_0}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left(\frac{x+w}{L}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{L}\right) \right\}. \quad (6)$$

В уравнении (6) выполнен переход от переменной  $t$  (времени диффузии) к более удобной переменной  $L = 2\sqrt{D_i t}$ , равной эффективной длине диффузии в одномерном случае.

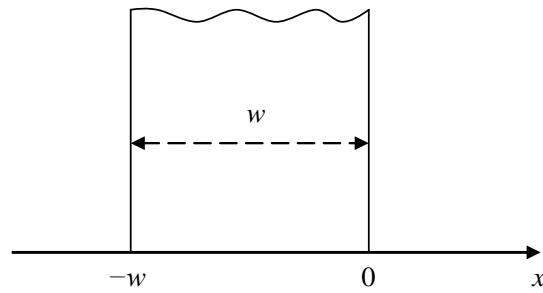


Рис. 1 – Расположение тонкой пленки толщины  $w$  относительно оси  $x$

Fig. 1 – Location of the thin film thickness  $w$  relative to the axis  $x$

Примем, что параметр  $\chi$  в формуле (2) определяется соотношением  $\chi = (L_0 + w/2)/h$ , а зависимость  $L_0 = L_0(L)$  определяется уравнением  $C_i(0, L)/C_i(L_0, L) = e$ . Результаты расчетов приведены на рис. 2.

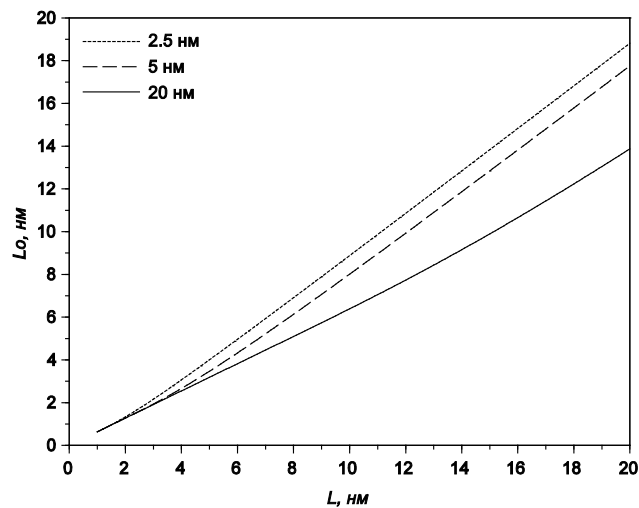


Рис. 2 – Зависимость диффузионного уширения тонкой пленки  $L_0$  от эффективной длины диффузии  $L$ . Для пунктирного, штрихового и сплошного графиков зависимости  $L_0$  от  $L$  значения исходной толщины пленки равны 2,5, 5 и 20 нм соответственно

Fig. 2 – The dependence of the diffusion broadening of the thin film  $L_0$  on the effective diffusion length  $L$ . For dotted, dashed and solid schedules depending  $L_0$  on  $L$  the value of the initial film thickness equal to 2,5, 5 and 20 nm, respectively

В качестве примера использования развитой методики рассмотрим танталовый диффузионный барьер в медной матрице. Характерное время диффузии  $t$  оценим по следующей методике. В рассматриваемом случае коэффициент диффузии зависит от времени, поскольку непрерывно изменяется эффективная толщина

тонкой пленки:  $w_{eff} = w + 2L_0(t)$ . Скорость увеличения диффузионной длины в одномерном случае определяется соотношением

$$\frac{dL}{dt} = \sqrt{\frac{D_i(L)}{t}}. \quad (7)$$

Здесь учтено, что  $L_0 = L_0(L)$ . Коэффициент диффузии (после очевидной подстановки  $D = D_i$ ) определяется соотношением (1). Зависимость эффективной длины диффузии от времени получена путем численного решения уравнения (8) и представлена на рис. 3. Исходные данные для расчетов представлены в таблице.

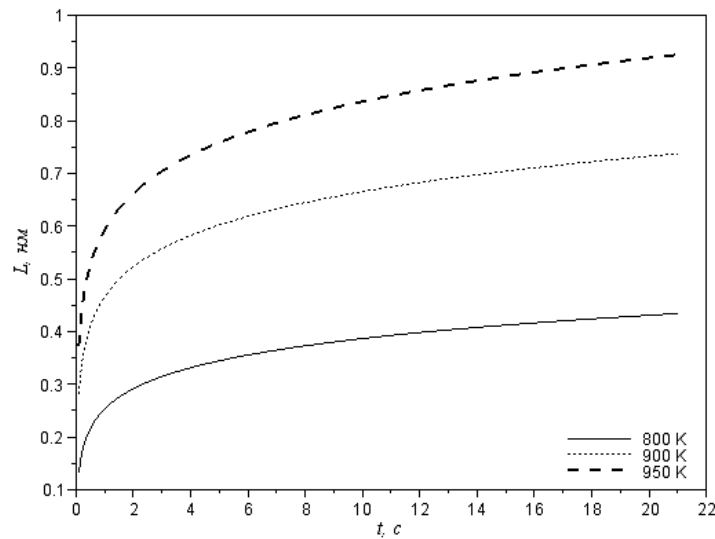


Рис. 3 – Зависимость диффузионной длины от времени. Толщина тонкой танталовой пленки 2,5 нм. Температура протекания диффузии 800, 900 и 950 К, соответственно

Fig. 3 – The dependence of the diffusion length of time. Thickness of the thin film of tantalum 2,5 nm. Low flow diffusion 800, 900 and 950 K, respectively

Данные для расчетов параметров диффузии Ta в Cu [4–6]  
Data for calculating the parameters of the diffusion Ta to Cu [4-6]

Вещество / Substance	$h$	$S_m$	$\Delta H_a(\infty)$	$D_0$
	нм	Дж/(моль·К)	кДж/моль	м <sup>2</sup> /с
Ta	0,3252	10,585	117	$2,02 \cdot 10^{-7}$
Cu (матрица) / (matrix)	0,2826	9,539	370	

Рассчитанное по формуле (3) значение  $\alpha$  для матрицы из меди и нанобъекта из тантала равно 1,85.

### 3. Обсуждение полученных результатов и выводы

Как следует из рис. 3, тантал является хорошим материалом для создания диффузионных барьеров между медными нанопроводниками и матрицей. Этот результат подтверждается доступными экспериментальными данными [5] и пока-

зывает адекватность разработанной нами методики. Следует отметить, что перспективными материалами для военной радиоэлектроники являются графен и его производные [7]. Графен обладает высокой температурой плавления ( $T_m \approx 4900$  К [8]) и слабой диффузионной подвижностью ( $\Delta H_a(\infty) \propto T_m$  [4]). При температуре выше 400 К коэффициент теплопроводности графена практически не зависит от температуры [9]. В работе [10] показана реализация схемы мультивибратора на графеновых лентах. Ширина графеновых лент составляла всего 8 нм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
2. Chernyshev A.P. Effect of hydrostatic pressure on self-diffusion in metal nanoparticles // *Physica: E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2009. – Vol. 41, iss. 10. – P. 1738–1740. – doi: 10.1016/j.physe.2009.05.001.
3. Chernyshev A.P. Effect of pressure on melting and solidification of metal nanoparticles // *Physics Letters A*. – 2009. – Vol. 373, iss. 11. – P. 1070–1073. – doi: 10.1016/j.physleta.2009.01.031.
4. Кан Р.У., Хаазен П. Физическое металловедение: в 3 т. Т. 1. – М.: Металлургия, 1987. – 640 с.
5. Thermal stability of a Cu/Ta multilayer: an intriguing interfacial reaction / H.J. Lee, K.W. Kwon, C. Ryu, R. Sinclair // *Acta Materialia*. – 1999. – Vol. 47, iss. 15. – P. 3965–3975.
6. Ouyang G., Wang C.X., Yang G.W. Anomalous interfacial diffusion in immiscible metallic multilayers: a size-dependent kinetic approach // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 86, iss. 17. – Art. 171914.
7. Сорокин П.Б., Чернозатонский Л.А. Полупроводниковые структуры на основе графена // *Успехи физических наук*. – 2013. – Т. 183, № 2. – С. 113–132.
8. Melting of graphene: from two to one dimension / K.V. Zakharchenko, A. Fasolino, J.H. Los, M.I. Katsnelson // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2011. – Vol. 23, № 20. – Art. 202202. – doi: 10.1088/0953-8984/23/20/202202.
9. Xie Z.-X., Chen K.-Q., Duan W. Thermal transport by phonons in zigzag graphene nanoribbons with structural defects // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2011. – Vol. 23, № 31. – Art. 315302.
10. Areshkin D.A., White C.T. Building blocks for integrated graphene circuits // *Nano Letters*. – 2007. – Vol. 7, № 11. – P. 3253–3259. – doi: 10.1021/nl070708c.

METHOD OF MICROELECTRONIC DEVICES SURVIVABILITY  
EVALUATION UNDER THE THERMAL ACTIONBorynyak L.A.,<sup>1</sup> Chernyshev A.P.<sup>2</sup><sup>1</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*<sup>2</sup>*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS,  
Novosibirsk, Russia*

Electromagnetic radiation is used in technological installations and during combat operations. Electromagnetic pulse is known as one of the damaging factors, causing significant damage to electronic equipment. Simulation of effects of electromagnetic pulse on elements of microelectronics is an urgent task to develop radio-electronic equipment with high resistance to this type of electromagnetic radiation. A method is suggested to evaluate the survivability of microelectronic devices under the thermal action. This method facilitates designing the new microelectronic devices with the enhanced reliability. Local heating leads to destructive processes in the semiconductor devices because of the diffusion rate enhancement. The method is based on the dependency

of diffusivity on the characteristic size of microelectronic elements. It is shown that diffusion processes are accelerated essentially at the nanoscale. The diffusion barrier Ta – Cu is examined for the endurance with respect to the thermal action. The results confirmed the method adequacy by comparison with the experimental data available in the literature. Evaluation of resistance to electromagnetic pulse microelectronics items made from new materials. The advanced materials for the manufacture of microelectronics for military purposes should have relatively high melting point, low diffusion mobility and weak dependence of physical properties with temperature. It is shown that the prospective materials include graphene and its derivatives.

*Keywords:* elements of microelectronics, thermal action, survivability evaluation, diffusive barriers, grapheme.

#### REFERENCES

1. Ricketts L.W., Bridges J.E., and Mileta J. *EMP Radiation and Protective Techniques*. New York, John Wiley and Sons, 1976. 380 p. (Russ. ed.: Rikets L.U., Bridzhes Dzh.E., Mailetta Dzh. *Elektromagnitnyi impul's i metody zashchity*. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 328 p.).
2. Chernyshev A.P. Effect of hydrostatic pressure on self-diffusion in metal nanoparticles. *Physica: E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2009, vol. 41, iss. 10, pp. 1738-1740. doi: 10.1016/j.physe.2009.05.001.
3. Chernyshev A.P. Effect of pressure on melting and solidification of metal nanoparticles, *Physics Letters A*, 2009, vol. 373, iss. 11, pp. 1070-1073. doi: 10.1016/j.physleta.2009.01.031.
4. Cahn R.W., Haasen P. *Physical Metallurgy*. 3rd Edition, in 3 volumes, vol. 1. Amsterdam, North-Holland, 1983. 645 p. (Russ. ed.: Kan R.U., Khaazen P. *Fizicheskoe metallovedenie*. V 3 t. T. 1. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 640 p.).
5. Lee H.J., Kwon K.W., Ryu C., Sinclair R. Thermal stability of a Cu/Ta multilayer: an intriguing interfacial reaction. *Acta Materialia*, 1999, vol. 47, iss. 15, pp. 3965-3975.
6. Ouyang G., Wang C.X., Yang G.W. Anomalous interfacial diffusion in immiscible metallic multilayers: a size-dependent kinetic approach. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 86, iss. 17, art. 171914.
7. Sorokin P.B., Chernozatonskii L.A. Poluprovodnikovye struktury na osnove grafena [Graphene-based semiconductor nanostructures]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Physics-Uspekhi (Advances in Physical Sciences)*, 2013, vol. 56, iss. 2, pp. 105-122. doi: 10.3367/UFNr.0183.201302a.0113. Translated from *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 183, no. 2, pp. 113-132.
8. Zakharchenko K.V., Fasolino A., Los J.H., Katsnelson M.I. Melting of graphene: from two to one dimension. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, vol. 23, no. 20, art. 202202. doi: 10.1088/0953-8984/23/20/202202.
9. Xie Z.-X., Chen K.-Q., Duan W. Thermal transport by phonons in zigzag graphene nanoribbons with structural defects. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, vol. 23, no. 31, art. 315302.
10. Areshkin D.A., White C.T. Building blocks for integrated graphene circuits. *Nano Letters*, 2007, vol. 7, no. 11, pp. 3253-3259. doi: 10.1021/nl070708c.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Леонид Александрович Борыняк** – родился в 1946 году, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: оптические методы измерения. Опубликовано свыше 200 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20. E-mail: borynyak-leonid@mail.ru).

**Borynyak Leonid Aleksandrovich** (b. 1946) – D.Sc. (Phys.&Math.), Professor, Professor of Physics Department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on optical measurement techniques. He is author of 200 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russia. Email: borynyak-leonid@mail.ru).



**Альфред Петрович Чернышев** – родился в 1956 году, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник Института химии твердого тела и механохимии СО РАН. Область научных интересов: физика конденсированного состояния, мезофизика. Опубликовано свыше 100 научных работ. (Адрес: 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе 18. E-mail: alfred.chernyshev@gmail.com).

**Chernyshev Alfred Petrovich** (b. 1956) – C.Sc. (Eng.), Assistant Professor, Senior Researcher in the Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on condensed matter physics, mesophysics. He is author of 100 scientific papers. (Address: 18, Kutateladze Street, Novosibirsk, 630128, Russia. Email: alfred.chernyshev@gmail.com).

*Статья поступила 02 февраля 2014 г.*

*Received February 02, 2014*

---

To Reference:

Borynyak L.A., Chernyshev A.P. Metodika otsenki vyzhivaemosti elementov mikroelektronnykh ustroystv pri teplovom vozdeistvii [Method of microelectronic devices survivability evaluation under the thermal action]. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2014, no. 2-3 (23-24), pp. 42-49.