

Дата поступления рукописи в редакцию: 04.03.2026 г.
Дата принятия рукописи в печать: 07.04.2026 г.
DOI: 10.24412/3034-4042-2026-1-83-89

КОРЯЧКО Марина Валерьевна,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГАОУ ВО Московский политехнический университет,
e-mail: scvor@list.ru

ВАРЛАМОВ Дмитрий Олегович,
научный сотрудник,
ФГАОУ ВО Московский политехнический университет,
e-mail: scvor@list.ru

БОГАТЕНКОВ Семен Алексеевич,
аспирант,
ФГАОУ ВО Московский политехнический университет,
e-mail: scvor@list.ru

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК И ДЕГРАДАЦИИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ НАГРЕВЕ

Аннотация. Современная микроэлектроника характеризуется непрерывной тенденцией к миниатюризации и повышению плотности упаковки компонентов, что предъявляет повышенные требования к надежности межсоединений и контактов. Одной из ключевых проблем, ограничивающих долговечность электронных устройств, является деградация межсоединений и контактных площадок при воздействии электротепловых нагрузок. Наиболее ярко это проявляется при импульсном нагреве. Резкие изменения температуры приводят к возникновению механических напряжений, что в конечном итоге является причиной усталостного разрушения и отказа устройства. Целью работы является экспериментальное изучение динамики нагрева дорожки металлизации при прохождении через нее последовательности прямоугольных токовых. В работе использовались экспериментальные методы определения динамики температуры алюминиевой дорожки металлизации после прохождения через нее как одиночных, так и последовательностей прямоугольных токовых импульсов. Полученные результаты целесообразно применять для определения критических мощностей электрических импульсов для различных межсоединений, а также при построении экспресс-методик по диагностики систем металлизации и контактов полупроводниковых структур.

Ключевые слова: электротепловая деградация, электрические импульсы, системы металлизации.

Работа выполнена в рамках государственного задания вуза Министерства науки и высшего образования (проект № FZRR-2023-0009).

KORYACHKO Marina Valeryevna,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Moscow Polytechnic University

VARLAMOV Dmitry Olegovich,
Researcher,
Moscow Polytechnic University

BOGATENKOV Semyon Alekseevich,
Postgraduate Student,
Moscow Polytechnic University

ASSESSMENT OF THERMAL LOADS AND DEGRADATION OF MICROELECTRONIC INTERCONNECTS WITH UNSTEADY HEATING

Annotation. Modern microelectronics is characterized by a continuous trend towards miniaturization and increasing the density of component packaging, which places increased demands on the reliability of interconnects and contacts. One of the key problems limiting the durability of electronic devices is the degradation of interconnects and contact pads when exposed to electrical thermal loads. This is most pronounced during pulsed heating. Sudden temperature changes lead to mechanical stresses, which ultimately causes fatigue failure and device failure. The aim of the work is to experimentally study the dynamics of heating of a metallization track when a sequence of rectangular current flows through it. Experimental methods were used to determine the temperature dynamics of an aluminum metallization track after passing through it both single and sequences of rectangular current pulses. It is advisable to use the results obtained to determine the critical power of electrical pulses for various interconnects, as well as to build express diagnostic methods for metallization systems and contacts of semiconductor structures.

Key words: electrothermal degradation, electrical impulses, metallization systems.

Эволюция электронных устройств и усовершенствование технологии в части разработки высоко интегрированных интегральных схем привела к развитию таких направлений как искусственный интеллект [1-3], интеллектуальные мобильные устройства [4; 5], цифровой медицинский мониторинг [6; 7] и т.д. Эти технологические тенденции требуют более высоких рабочих плотностей тока и соответствующих тепловых нагрузок для обеспечения обработки и передачи данных с высокой пропускной способностью [8].

Для достижения высокой плотности интеграции внедряются технологии формирования полупроводниковых структур, такие как system-in-package (SiP - это технология, при которой различные электронные компоненты, такие как чипы, пассивные элементы, модули, интегрируются в один пакет), многослойное трехмерное формирование и т.д. Очевидно, что сложные технологические решения требуют специальные электрические соединения между цепями и элементами. От их стабильной работы зависит функционирование всего устройства. Дефектные электрические соединения будут способствовать ограничению миниатюризации и быстрому выходу устройства из строя [9-10]. Поэтому исследователи ищут новые материалы как для систем металлизации и контактов, так и для полупроводниковых подложек. Так, например, в [9], показано, что в отличие от кремниевых подложек, карбид кремния (SiC) удовлетворяет условиям для применения в высоковольтных и высокотемпературных полупроводниковых структурах благодаря своим электрическим и тепловым свойствам. Однако высокий значения модуля Юнга SiC и высокая стоимость производства подложек сдерживают его широкое применение в технологической практике [9]. В том числе поэтому кремний продолжает сохранять лидерство при изготовлении силовых полупроводниковых приборов и структур. Однако и на нем не все проблемы систем металлизации и омических контактов решены. К примеру, в работе [10] представлены результаты исследований ухудшения адгезионной прочности поверхности раздела тонкая металлическая пленка/подложка, подвергнутой термоциклированию. Известно [11], что традиционные методы ускоренных термоциклических испытаний, предполагающие

нагрев всей структуры в климатической камере, зачастую не в полной мере отражают реальные условия эксплуатации. Они не всегда могут воспроизвести условия локальных быстропротекающих процессов (перегрев может происходить за десятки микросекунд). Это обстоятельство инициирует поиск и разработку методов, позволяющих моделировать циклические термоудары в системах металлизации

Вот почему целью данной работы было исследование тепловых нагрузок и процессов деградации микросистемных межсоединений при нестационарном нагреве последовательностью токовых импульсов.

Проведение исследований проводилось по методике, изложенной [12]. Для пропуска серии прямоугольных токовых импульсов источник прямоугольных токовых импульсов амплитудой до 40 А и длительностью до 1 мс, осциллограф и оптический микроскоп. Длительность импульсов и скважность варьировались в диапазонах $t=50...500$ мкс и $S=2...10$ соответственно.

Эксперименты проводили на структурах, детально описанных в [13]. Тонкая металлическая пленка алюминия наносилась на полированную поверхность кремниевой пластины n-типа (легирована фосфором, удельное электрическое сопротивление $\rho=15$ Ом.см). Кристаллографическая ориентация Si-пластины соответствовала направлению (111) [13].

Тестовые структуры изготавливались методом оптической фотолитографии [13; 14] и представляли собой прямолинейные дорожки металлизации шириной 75 мкм, длиной – 4 мм и толщиной 2...5 мкм соответственно. При пропуске через пленочный проводник электрических импульсов методом вольтметра-амперметра регистрировалось падение напряжения с участка тестовой структуры $U(t)$. Изготовленная установка позволяла пропускать как одиночные импульсы (рис.1), так и их последовательность (рис.2). На рис.1 приведена фотография осциллограммы $U(t)$ в процессе прохождения токового импульса прямоугольной формы.

Ранее было показано, что такая форма осциллограммы свидетельствует об обратимом нагреве системы металлизации. Причем время охлаждения структуры превышает длительность

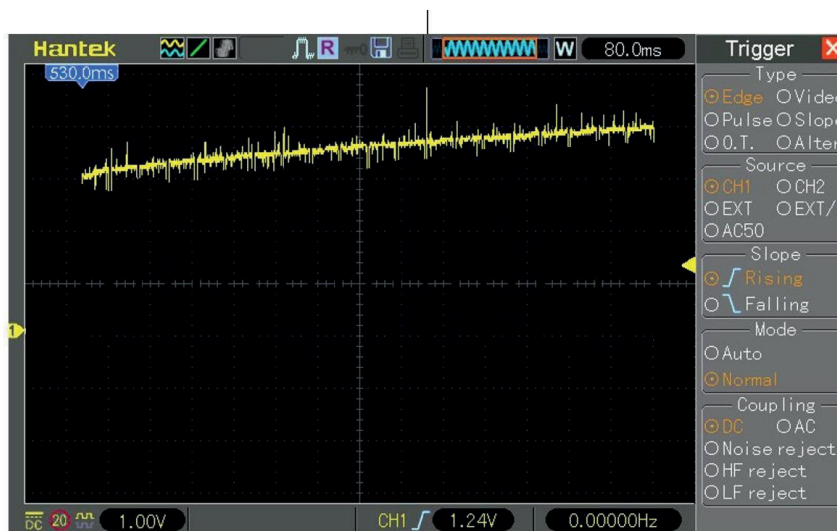
импульса ~ 1.5 т. При этом плотность тока в импульсе не должна превышать $j=5 \cdot 10^{10}$ А/м².

Пересчет осциллограмм $U(t)$ в динамику температуры осуществлялся по известной формуле:

$$U(t) = R_0(1 + \alpha(T(t) - T_0)) \quad (1)$$

Здесь $\alpha \cdot R_0$ – температурный коэффициент сопротивления и электрическое сопротивление тестовой структуры при комнатной температуре соответственно.

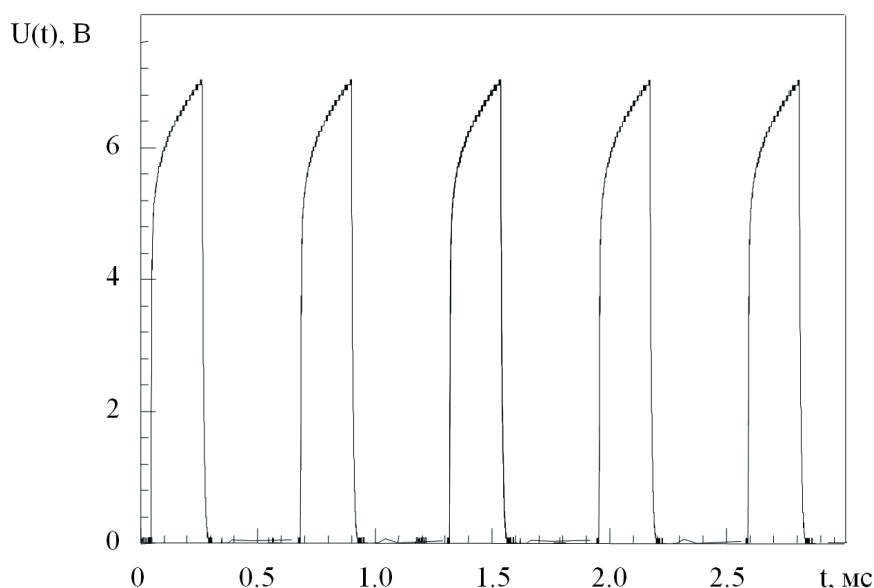
Рисунок 1. Фотография экрана осциллографа с осциллограммой включения, полученной после прохождения электрического импульса через тест-структуру.



Типичная осциллограмма последовательности импульсов приведена на рис.2. Очевидно, что при интервале времени между электрическими импульсами $t > t_0$, область полупроводника под дорожкой металлизации структура успевает охладиться. Поэтому вид $U(t)$ после каждого импульса практически не меняется (рис. 2). Увеличение амплитуды импульса тока или снижение скважности приводит к накоплению тепла в структуре, что

проявляется в изменении вида $U(t)$. Так, на рис.3 видно увеличение как максимального значения $U(t)$ при увеличении числа прошедших импульсов через структуру, так и изменение крутизны $U(t)$. Тепловая «нагрузка» на заключительном этапе ($\Delta t = 2.0 \dots 3.0$ мс, рис.3) способствует развитию необратимых процессов. Это и есть начало электротепловой деградации (последний импульс, интервал $\Delta t = 2.5 \dots 3.0$ мс, рис.3)

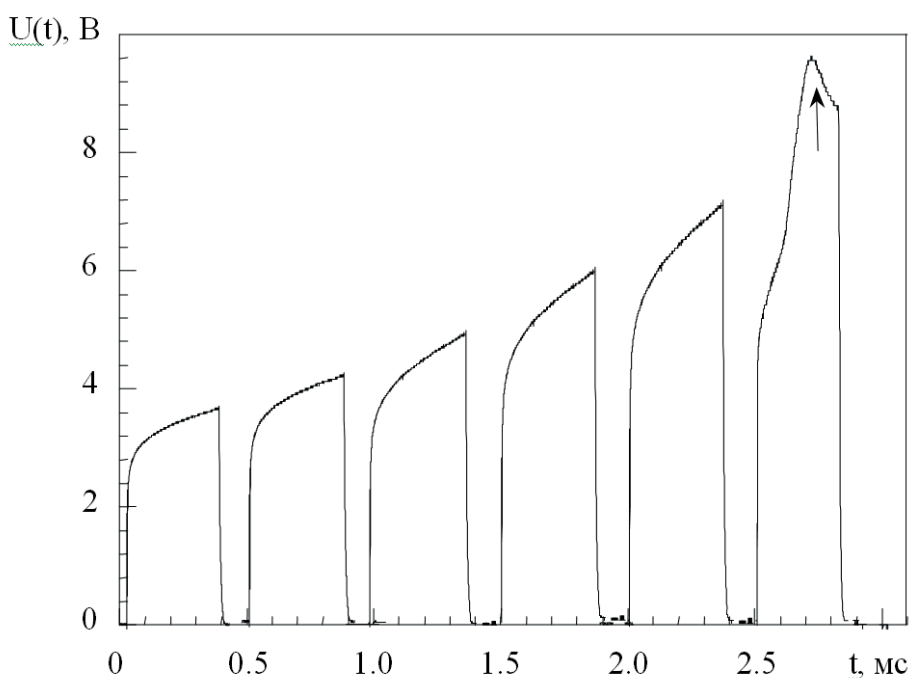
Рисунок 2. Осциллограмма включения, снятая при прохождении последовательности прямоугольных токовых импульсов амплитудой $j = 4.5 \cdot 10^{10}$ А/м², длительностью $T_{oi} = 250$ мкс и скважностью $S = 1.6$.



Наблюдаемый резкий всплеск потенциала $U(t)$ на осциллограммах (стрелка на рис.3) обусловлен накоплением тепла в области контакта и его нагреву до температур образования жидкой фазы. Изменение удельного сопротивления при фазовом переходе Al-металлизации и определяет скачек потенциала. Более того, в нашей системе Al-Si возможно формирование расплавленной прослойки на границе раздела. В случае системы алюминий – кремний имеет минимум на диаграмме фазового состояния. При этом процесс

контактного плавления может происходить при температурах $T_{кр}$ ниже температуры плавления контактирующих материалов (температура плавления эвтектики в системе Al-Si $T_{кр}=577^{\circ}\text{C}$). В наших экспериментальных условиях образующаяся зона расплава удерживается силами поверхностного натяжения. Если при этом толщина зоны контактного плавления растет пропорционально корню из времени $h_x \sim t^{1/2}$, то лимитирующей стадией такого процесса является диффузионный перенос атомов[14-16].

Рисунок 3 Динамика падения напряжения $U(t)$, снятого с участка тестовой структуры, в процессе прохождения последовательности 6-ти прямоугольных электрических импульсов: $j=4.5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, $T=0.4 \text{ мс}$, скважность $S=1.25$



Для детального анализа результатов тепловой деградации после прохождения последовательности импульсов проводилась электронная микроскопия поверхности образцов с

помощью оптической и электронной микроскопии JSM-5910LVJEOL. Пример теплового разрушения структуры приведены на рис.4,5.

Рисунок 4. Микрофотография электротепловой деградации дорожки алюминиевой металлизации после прохождения электрического импульса $T=500 \text{ мкс}$ и $j=4.5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$.

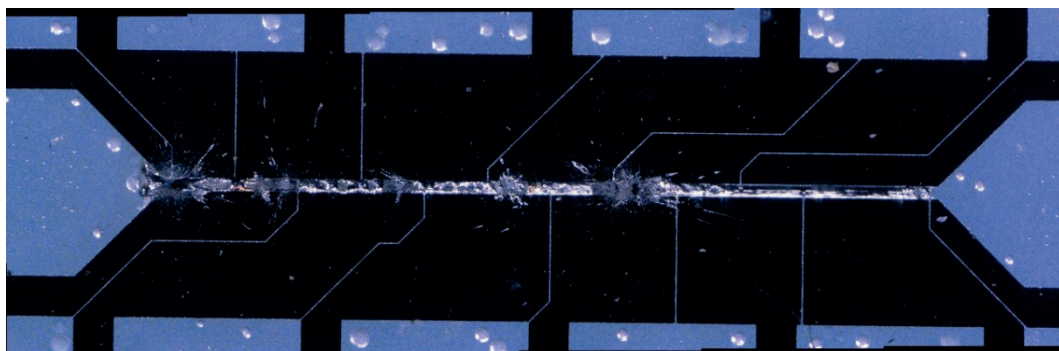
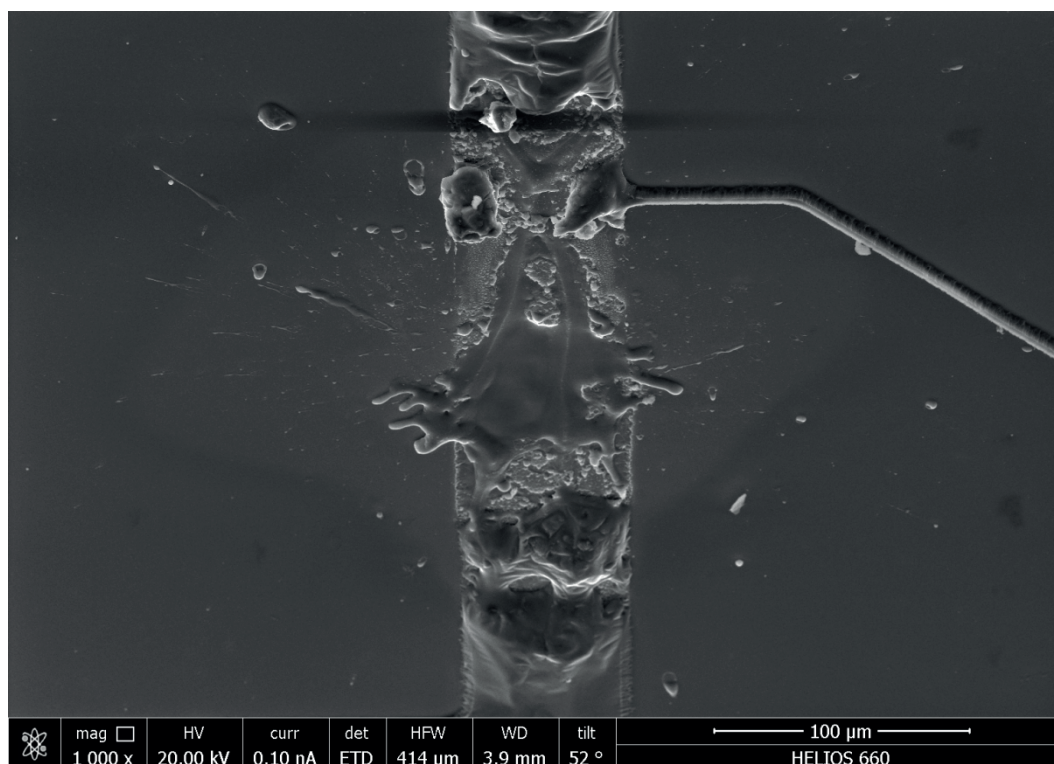


Рисунок 5. РЭМ фотография разрушения с параметрами, указанными на рис.4.



Таким образом, из экспериментального изучения воздействия последовательности электрических импульсов прямоугольной формы следует отметить, что основным механизмом разрушения структуры являются фазовые превращения с участием жидкой фазы. В случае воздействия оди-

ночным прямоугольным импульсов амплитудой $j=(2.5...8) \cdot 10^{10}$ А/м² и длительностью $T=85...500$ мкс основным механизмом является оплавление алюминия. Установлено также, что при прохождении последовательности импульсов характер деградационных процессов не меняется.

Список литературы:

- [1] Liu Y., Pan Y., Zhang H., Sun R., Zhu P A sandwich-structured anisotropic conductive film with robust interfacial reliability and conductivity for functional electrical interconnections // *Chemical Engineering Journal*. — 2025. — №. 505. — С. 159722.
- [2] Chen B., Zeng M., Khoo K.H., Das D., Fong X., Fukami S., Li S., Zhao W., Parkin S.S.P., Piramanayagam S.N., Lim S.T. Spintronic devices for high-density memory and neuromorphic computing – A review // *Materials Today*. — 2023. — №. 70. — С. 193-217.
- [3] Wang M., Li L., Zhang T. Hysteresis-free, fatigue-resistant and self-adhesive conductive hydrogel electronics towards multimodal wearable application // *Nano Energy*. — 2024. — №. 126. — С. 109586.
- [4] Liu X., Tang X., Hu Y., Huo X., Lv P., Shao H., Ma Q., Yu W., Xie Y., Dong X. Electrospun thermotropic anisotropic conductive Janus nanoribbons array membrane endowed with fluorescence and magnetism for multi-scenario applications // *Journal of Colloid and Interface Science*. — 2026. — №. 705. — С. 139490.
- [5] Li J., Duan Y., Cao H. , Wang Y. , Lu X., Xu Y. , Sun R., Hu Y. Pressure-adaptive core-shell liquid metal microspheres for reliable flip-chip interconnects // *Chemical Engineering Journal*. — 2025. — №. 520. — С. 165694.
- [6] Choi J., Nam H., Park D., Cho W., Kwak M., Kim N., Kim I.-S., Jeong U. Room-Temperature, High-Resolution Soft Anisotropic Conductive Film for Electrical Interfacing in Stretchable Electronics // *Advanced Functional Materials*. — 2025. — №. 11. — С. 754-761.
- [7] Zhao K., Wang J., Deng W., Shen C., Zheng G., Ji Y., Dai K., Liu C., Shen C. Alternating aligned conductive stripes in polypropylene film with remarkable anisotropy for sensing application // *Sensors and Actuators B: Chemical*. — 2021. — №. 330. — С. 129370.
- [8] Wu Q., Nie M., Wang Q., Wu S., Zhang Y. Mechanically robust and functional anisotropic conductive polymer composites with alternating microlayers // *Chemical Engineering Journal*. — 2023. — №. 475. — С. 146337.
- [9] Sankari R., Kessler U., Rittner M., Kilian B., Maniar Y., Wittle O., Schneider-Ramelow M.

Microelectronics Reliability // Degradation mode analysis of Cu bond wires on Cu plated SiC power semiconductors stressed by active power cycling. — 2025. — №. 169. — C. 115715.

[10] Zhao D., Letz S., Yu Z., Schletz A., März M. Combined experimental and numerical approach for investigating the mechanical degradation of the interface between thin film metallization and Si-substrate after temperature cycling test // *Microelectronics Reliability. — 2020. — №. 114. — C. 113785.*

[11] Liu J., Wu S., Chen T., Liu T., Zhang S., He P. Thin-film metallization and micro-assembly driven comparative failure modes in advanced ceramic packaging under thermal cycling // *Journal of Materials Processing Technology. — 2025. — №. 346. — C. 119119.*

[12] Skvortsov A.A., Pshonkin D.E., Volodina O.V., Nikolaev V.K. Metallization system as a part of thermal memory // *Heliyon. — 2023. — №. 9. — e15797.*

[13] Skvortsov A.A., Varlamov D.O., Nikolaev V.K., Volodina O.V., Skvortsova A.A. Shock-wave Processes in the Electric Explosion of Thin-Film Systems on Silicon // *Silicon. — 2023. — Vol. 15. — Iss. 4. — P. 1987–1992.*

[14] Skvortsov A.A., Orlov A.M., Zuev S.M. Diagnostics of degradation processes in the metal-semiconductor system // *Russian Microelectronics. — 2012. — №. 41. — C. 31-40.*

[15] Mu D., Cao L., Fu Y., Jia Y., Lin X., Jiang W. The microstructural evolution of eutectic Bi-Sn thin films prepared by magnetron co-sputtering during melting and solidification processes // *Materials Today Communications. — 2025. — №. 43. — C. 111520.*

[16] Han J., Li X., An T., Wang Y., Guo F. Failure analysis and simulation of IGBT under active and passive thermal cycling // *Microelectronics Reliability. — 2025. — №. 167. — C. 115638.*

References:

[1] Liu Y., Pan Y., Zhang H., Sun R., Zhu P. A sandwich-structured anisotropic conductive film with robust interfacial reliability and conductivity for functional electrical interconnections // *Chemical Engineering Journal. — 2025. — No. 505. — P. 159722.*

[2] Chen B., Zeng M., Khoo K.H., Das D., Fong X., Fukami S., Li S., Zhao W., Parkin S.S.P., Piramanayagam S.N., Lim S.T. Spintronic devices for high-density memory and neuromorphic computing – A review // *Materials Today. — 2023. — No. 70. — pp. 193-217.*

[3] Wang M., Li L., Zhang T. Hysteresis-free, fatigue-resistant and self-adhesive conductive hydrogel electronics towards multimodal wearable application // *Nano Energy. — 2024. — No. 126. — P. 109586.*

[4] Liu X., Tang X., Hu Y., Huo X., Lv P., Shao H., Ma Q., Yu W., Xie Y., Dong X. Electrospun thermotropic anisotropic conductive Janus nanoribbons array membrane endowed with fluorescence and magnetism for multi-scenario applications // *Journal of Colloid and Interface Science. — 2026. — No. 705. — P. 139490.*

[5] Li J., Duan Y., Cao H., Wang Y., Lu X., Xu Y., Sun R., Hu Y. Pressure-adaptive core-shell liquid metal microspheres for reliable flip-chip interconnects // *Chemical Engineering Journal. — 2025. — No. 520. — P. 165694.*

[6] Choi J., Nam H., Park D., Cho W., Kwak M., Kim N., Kim I.-S., Jeong U. Room-Temperature, High-Resolution Soft Anisotropic Conductive Film for Electrical Interfacing in Stretchable Electronics // *Advanced Functional Materials. — 2025. — No. 11. — pp. 754-761.*

[7] Zhao K., Wang J., Deng W., Shen C., Zheng G., Ji Y., Dai K., Liu C., Shen C. Alternating aligned conductive stripes in polypropylene film with remarkable anisotropy for sensing application // *Sensors and Actuators B: Chemical. — 2021. — No. 330. — P. 129370.*

[8] Wu Q., Nie M., Wang Q., Wu S., Zhang Y. Mechanically robust and functional anisotropic conductive polymer composites with alternating microlayers // *Chemical Engineering Journal. — 2023. — No. 475. — P. 146337.*

[9] Sankari R., Kessler U., Rittner M., Kilian B., Maniar Y., Wittle O., Schneider-Ramelow M. *Microelectronics Reliability // Degradation mode analysis of Cu bond wires on Cu plated SiC power semiconductors by active power cycling. — 2025. — No. 169. — P. 115715.*

[10] Zhao D., Letz S., Yu Z., Schletz A., März M. Combined experimental and numerical approach for investigating the mechanical degradation of the interface between thin film metallization and Si-substrate after temperature cycling test // *Microelectronics Reliability. — 2020. — No. 114. — P. 113785.*

[11] Liu J., Wu S., Chen T., Liu T., Zhang S., He P. Thin-film metallization and micro-assembly driven comparative failure modes in advanced ceramic packaging under thermal cycling // *Journal of Materials Processing Technology. — 2025. — No. 346. — P. 119119.*

[12] Skvortsov A.A., Pshonkin D.E., Volodina O.V., Nikolaev V.K. Metallization system as a part of thermal memory // *Heliyon. — 2023. — No. 9. — e15797.*

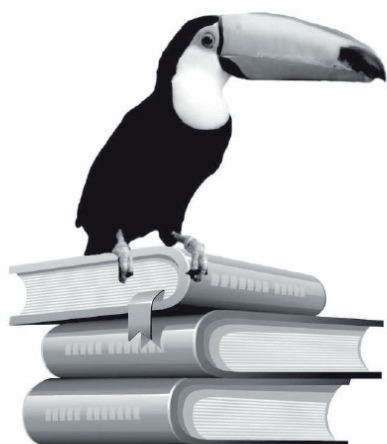
[13] Skvortsov A.A., Varlamov D.O., Nikolaev V.K., Volodina O.V., Skvortsova A.A. Shock-wave Processes in the Electrical Explosion of Thin-Film Systems on Silicon // *Silicon. — 2023. — Vol. 15. — Iss. 4. — P. 1987–1992.*

[14] Skvortsov A.A., Orlov A.M., Zuev S.M. Diagnostics of degradation processes in the metal-semiconductor system // *Russian Microelectronics. — 2012. — No. 41. — pp. 31-40.*

[15] Mu D., Cao L., Fu Y., Jia Y., Lin X., Jiang W. The microstructural evolution of eutectic Bi-Sn thin

films prepared by magnetron co-sputtering during melting and solidification processes // *Materials Today Communications*. - 2025. - No. 43. - P. 111520.

[16] Han J., Li X., An T., Wang Y., Guo F. Failure analysis and simulation of IGBT under active and passive thermal cycling // *Microelectronics Reliability*. —2025. -167. —С. 115638.



ЮРКОМПАНИ

www.law-books.ru

Юридическое издательство
«ЮРКОМПАНИ»

Издание учебников,
учебных и методических
пособий, монографий,
научных статей.

Профессионально.

В максимально
короткие сроки.

Размещаем
в РИНЦ, Е-Library.