

ДИНАМИКА ТЕПЛООВОГО РАЗРУШЕНИЯ СТРУКТУР Al-Ti-Si И Al-Si ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

М.В. Корячко, Д.Е. Пшонкин,

А.Д. Проскуненко, К.Е. Доронина

Московский Политехнический университет, Москва, Россия

В работе проведено экспериментальное исследование особенностей теплового разрушения систем Al-Ti-Si и Al-Si при импульсном токовом воздействии. Представлена динамика нагрева систем при плотностях тока $j > 3 \cdot 10^{10}$ А/м² и длительностью до 500 мс. Выявлены начальные стадии процессов плавления в тонкопленочных системах и механизмы разрушения структур в процессе прохождения одиночного прямоугольного импульса тока. Так, наличие подслоя Ti повышает тепловую устойчивость многослойной системы, основные механизмы разрушения структур связаны с явлением электропереноса, а также миграцией расплавленных зон в поле градиента температуры после отключения импульса вблизи локального теплового источника. Работа выполнена в рамках государственного задания вузам Министерства науки и высшего образования (проект № FZRR-2023-0009).

Ключевые слова: многослойная система металлизации, разрушение, импульс тока, металлическая пленка, титан, диэлектрическая пленка.

На сегодняшний день основной фокус разработчиков интегральных микросхем сосредоточен на создании новых видов микропроцессоров и интегральных схем, а также на развитии технологий изготовления полупроводниковых устройств, базирующихся на сложных полупроводниковых материалах [1, 2]. Так как основной причиной выхода таких устройств из строя, по-прежнему, является система металлизации и контакты, то исследования по созданию многоуровневых систем является ключевой [3, 4]. Одним из недостатков применения алюминиевой металлизации является склонность к электромиграции, высокая диффузионная подвижность по границам зерен, недостаточная механическая прочность пленок Al, и ограничения по присоединению выводов с использованием пайки [5, 6]. Поэтому, из-за этих недостатков в интегральных схемах и транзисторах с мелкими р-п-переходами применяют многослойные системы с подслоями металлов [7, 8]. Так как первый слой металла должен обладать хорошей адгезией как к кремнию, так и к диоксиду кремния, а также низкими значениями коэффициентов растворимости и диффузии в этих материалах, то для этого часто используется титан [9, 10, 11]. Однако многослойные системы ввиду различных теплофизических характеристик материалов при работе в импульсных режимах и при высоких токовых нагрузках в силовой электронике, подвергаются большим тепловым нагрузкам, что приводит к отказу системы металлизации.

Целью данной работы является экспериментальное изучение динамики нагрева многослойных структур на примере Al-Ti-Si и Al-Si при импульсном токовом воздействии.

В качестве объектов экспериментального исследования были сформированы структуры типа металл-полупроводник (Al-Si), металл-подслой-полупроводниковая пластина Al-Ti-Si. В роли металлического подслоя выступали титан (Ti), улучшающие контактные, адгезионные и барьерные свойства токопроводящих систем. В качестве подложек использовались легированные бором кремниевые пластины, ориентированные в направлении (111), с удельным сопротивлением $\rho = 0.01 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ [12]. Толщина металлического подслоя h_2 варьировалась в диапазоне 100 нм, а толщина алюминиевой пленки h_1 до 3 μm [13]. Далее методом оптической фотолитографии формировалась тестовая структура (рисунок 1).

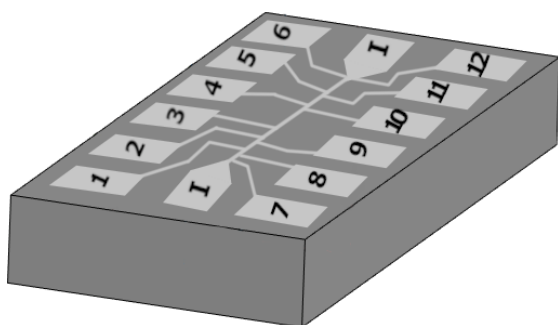


Рисунок 1. – Вид тестовой структуры Al-Ti-Si, где I, 1–12 – Al контактные площадки для пропускания импульса тока $I(t)$ и регистрации осциллограмм $U(t)$

Для регистрации фазовых изменений в исследуемых структурах нами использовался осциллографический метод. Падение напряжение снималось с разных участков структуры 1–12 (рисунок 1) и позволяет фрагментарно отслеживать состояние металлизированной поверхности полупроводника. Регистрация температурных изменений в тонкопленочной структуре производилась по методике, детально описанной в [12, 13].

Для рассмотрения вопроса разрушения многослойных тонкопленочных систем особое внимание стоит уделить температурным режимам работы структур Al-Ti-Si. Динамика температуры дорожки металлизации $T_1(t)$ рассчитывалась по изменению падения напряжения $U(t)$ [13, 14]:

$$U(t) = I(t)R_0(1 + \alpha(T_1(t) - T_0)), \quad (1)$$

здесь R_0 – сопротивление дорожки металлизации при $T_0 = 290 \text{ K}$, измеренное методом вольтметра–амперметра;

$\alpha = 0.0043 \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент сопротивления алюминия.

Типичные результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 3.

На рисунке 3 показана динамика нагрева межсоединений на пластинах кремния с учетом подслоя Ti. Наличие диэлектрической пленки увеличивает тепловую нагрузку на структуру, обнаружено, что образование расплавленных участков связано с плохой адгезией и с локальным уменьшением поперечного сечения пленки [14]. В случае бинарной структуры Al-Si механизмы разрушения структуры связаны с оплавлением дорожки металлизации и контактным плавлением на межфазной границе Al-Si. Обнаружено, что наличие подслоя титана приводит к снижению величины критической плотности тока.

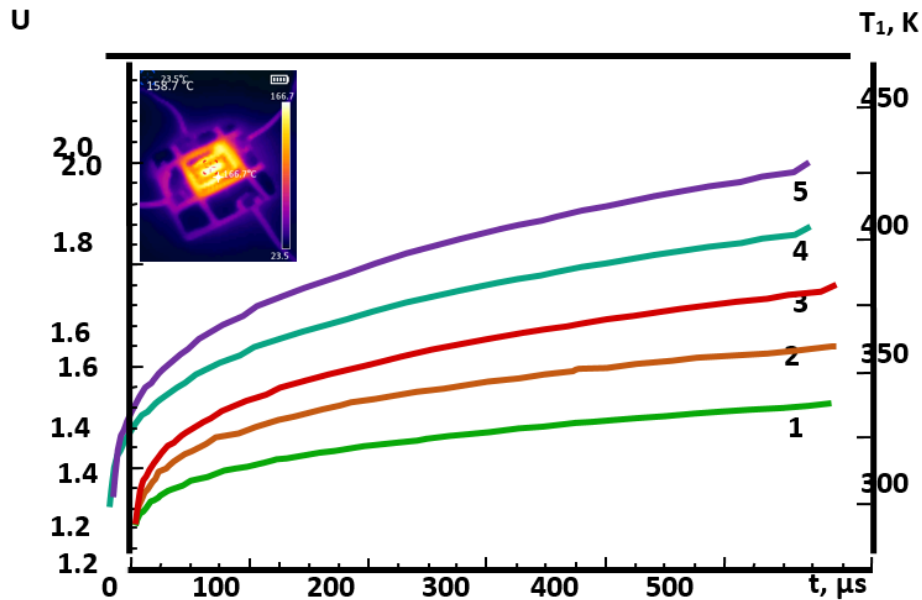


Рисунок 3. – Осциллограммы включения системы Si-Ti-Al при различной толщине подслоя Ti: 1 – $h_2=0$; 2 – $h_2=80$; 3 – $h_2=100$; 4 – $h_2=130$; 5 – $h_2=170$ nm; $j=6.0 \cdot 10^{10}$ A/m²; $h_1=2$ μm; длительность импульсов 500 μs, на вставке: ИК-фотография структуры при пропускании импульса тока

Для оценки температурных полей, возникающих в структуре при рассматриваемых параметрах электрических импульсов, использовалось уравнение [12]:

$$T_1 = T_0 + \frac{j^2 R_1}{S} \left[\frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{1}{c_3 d_3} \sqrt{\frac{t}{a_3}} \right]. \quad (2)$$

Здесь и далее индекс «1» относится к алюминиевой металлизации, «2» – к диэлектрическому подслою, а «3» – к полупроводниковой подложке, h – толщина, λ – теплопроводность, c , d , a – теплоемкость, плотность и температуропроводность соответственно.

Поскольку все параметры зависят от температуры, то, как и ранее [12, 13], для расчетов T_1 использовались их значения, усредненные по температуре. Для этого исследуемый временной промежуток разбивался на малые интервалы Δt . И усредненное значение каждого параметра вычислялось как среднеинтегральное значение*, принимаемое им на всех элементарных интервалах.

Из (2) нетрудно видеть, что динамика нагрева структуры зависит от силы тока, параметров полупроводниковой матрицы, а также теплопроводности и толщины промежуточной диэлектрической пленки.

Далее рассмотрим динамику нагрева многослойной структуры Al-Ti-Si при $j = j_{kr}$ (рисунок 4).

* Под среднеинтегральным значением величины b будем понимать $b = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_0}^{T_1} b(T) dT$.

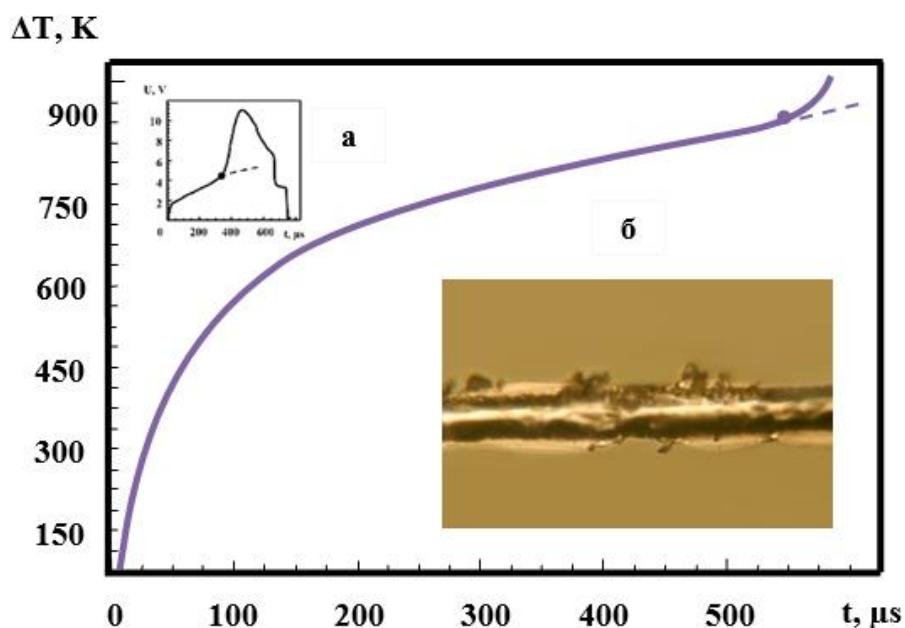


Рисунок 4. – Расчет температуры алюминиевой металлизации $\Delta T_1(t) = T_1(t) - T_0$ при прохождении импульса тока плотностью: $1 - 7.0 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$; на вставке: **а**– осциллограмма включения систем Si-Ti-Al, снятая при прохождении одиночного импульса тока длительностью 800 μs и амплитудой $6,4 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$; **б**– фотография структуры Si-Ti-Al, после прохождения одиночного импульса тока длительностью 500 μs и амплитудой $6 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$

Для многослойной системы с толщиной Al 0.5 μm и Ti подслоем толщиной 0.1 μm превалирующим механизмом разрушения структуры является процесс оплавления металлической пленки, а при увеличении длительности импульса более 80 μs , основным механизмом становится контактное плавление.

Основные деградационные процессы связаны с явлением электропереноса, а также миграцией расплавленных зон (рисунок 4, вставка б) в поле градиента температуры после отключения импульса вблизи локального теплового источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Felix Meier, Cornelia Schwarz, Ewald Werner. Crystal-plasticity based thermo-mechanical modeling of Al-components in integrated circuits. Computational Materials Science. Volume 94,2014, Pages 122–131.
2. Wei He, Zixuan Wang, Jiaqi Li, Qiang Li. Investigation of heat transfer performance for through-silicon via embedded in micro pin fins in 3D integrated chips // International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 214, 2023, 124442.
3. Ahmad S.M., Leong Ch.S., Winder R.W., Sopian K., Zaidi S.H. Electrical, Morphological, and Compositional Characterization of Screen-Printed Al Contacts Annealed in Horizontal and Vertical Configurations. Journal of Electronic Materials, 2019, 48(10), 6382–6396.
4. Paul T. Vianco. A Review of Interface Microstructures in Electronic Packaging Applications: Soldering Technology // JOM. 2019. – Vol. 71. Iss. 1. – P. 158–177.
5. Brincker M., Pedersen K.B., Kristensen P.K., Popok V.N. Effects of thermal cycling on aluminum metallization of power diodes. Microelectronics Reliability, 2015, 55(9–10), 1988–1991.
6. Fangwei Lv, Pingan Liu, Hui Qi, Junpeng Liu, Ruochen Sun, Wenchao Wang. The early stage of the thermal pulse explosions of aluminum nanowires under different energy deposition levels // Computational Materials Science. – 2019. – Vol. 170. – P. 109142.

7. Dornic N., Ibrahim A., Khatir Z., Tran S.H., Ousten J.-P., Ewanchuk J., Mollov S. Analysis of the degradation mechanisms occurring in the topside interconnections of IGBT power devices during power cycling // *Microelectronics Reliability*. 2018. 88–90, pp. 462–469.
8. Smitha P.S., Babu V.S., Shiny G. Critical parameters of high performance metal-insulator-metal nanocapacitors: A review // *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6. Iss. 12. Article № 122003.
9. Ghosh S., De B.P., Kar R., Mandal D., Mal A.K. Optimal design of complementary metal-oxide-semiconductor analogue circuits: An evolutionary approach. // *Computers and Electrical Engineering*. 2019. Vol. 80. Article № 106485.
10. Dang B., Zhilenkov A.A. Numerical solutions for nonhomogeneous thermal conductivity problems in composite layered media // *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. 2019. Article № 8656646. P. 210–213.
11. Xufei Fang, Yan LiYan Li, Yue Mengkun, Xue Feng. Chemo-mechanical coupling effect on high temperature oxidation: A review // *Science China Technological Sciences*. 2019. Vol 12. Iss.4. P.2–25.
12. Skvortsov A., Zuev S., Koryachko M., Glinskiy V. Thermal shock and degradation of metallization systems on silicon // *Microelectronics International*. 2016. Vol. 33. Iss. 2. P. 102–106.
13. Skvortsov A.A., Koryachko M.V., Zuev S.M., Rybakova M.R. Degradation processes in the Al-Ti-Si system under thermal shock. *Periódico Tchê Química*. Vol. 17. 335–342 (2020).
14. Koryachko M.V., Varlamov D.O., Skvortsov, A.A., Voloshin E.B., Guskov A.A. Dynamics of thermal destruction of Al-(Ti,SiO₂)-Si structures under pulsed action. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 13065 (2024).