

**ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЕ РАЗРУШЕНИЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ
ТОНКОЙ ПЛЕНКИ НИТРИДА КРЕМНИЯ НА КРЕМНИИ
В ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВ НАНО- И МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ**

**канд. физ.-мат. наук М. В. КОРЯЧКО, канд. физ.-мат. наук Д. Е. ПШОНКИН
(Московский политехнический университет, Россия)**

В работе рассматриваются механизмы формирования расплавленных зон в процессе электрического взрыва тонких пленок алюминия на поверхности пленок нитрида кремния. Проведена оценка величины градиента температур вблизи дорожки металлизации, а также характерных времен динамики расплавленных зон под действием температурного градиента. Обнаружено, что после прохождения одиночного импульса тока дорожка системы Al-Si₃N₄-Si оплавляется без разрывов. Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых (проект МК-1156.2021.4).

Ключевые слова: тонкие пленки нитрида кремния, электрический взрыв проводников, градиент температуры и термоупругие напряжения.

Известно, что воздействие тепловых ударов используют для оценки надежности электронных компонентов и систем [1]. Подобные ускоренные испытания проводятся в условиях термоциклирования и позволяют быстро определить срок службы изделия. Такие испытания, как правило, провоцируют отказы, связанные с явлениями перегрева, появлением термоупругих напряжений [2] и диффузионными процессами в структурах. В случае полупроводниковых устройств, термоциклирование в комбинации с рядом других воздействующих факторов позволяет значительно сократить длительность испытаний, направленных на выявление скрытых дефектов. Данные, полученные в ходе таких испытаний, могут быть использованы для оценки надежности устройств при работе в нормальных условиях эксплуатации.

Аналогичные подходы применяют и к исследованиям структуры готовых микросхем для выявления «слабых» мест и дефектов структуры, которые потенциально могут привести к отказу. Традиционно, к числу объектов пристального внимания относятся и системы металлизации [3], поскольку сложная геометрия и высокие плотности тока способствуют ускоренной деградации проводниковых систем и контактов [4] вплоть до электрического взрыва проводниковых систем.

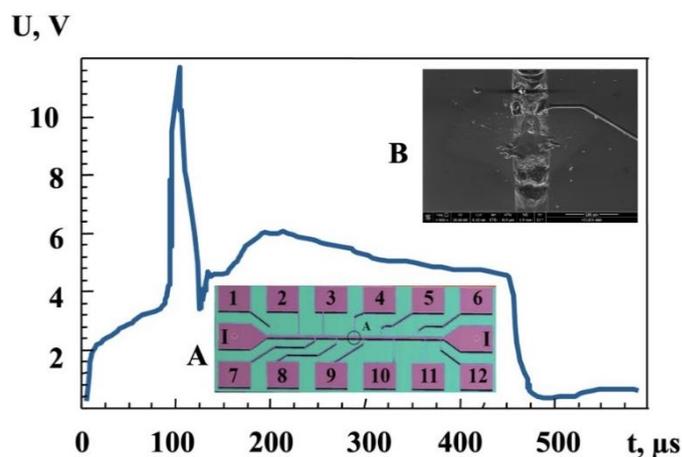
Поэтому цель данной работы состоит в детальном изучении механизмов разрушения межсоединений на поверхности кремния с тонкой пленкой нитрида (Si₃N₄) при воздействии токовых импульсов высоких плотностей.

В роли объектов исследования выступали структуры типа Al-Si₃N₄-Si, представляющие собой системы металлизации напыленные на тонкие пленки Si₃N₄, выращенные на подложках монокристаллического кремния. Кремниевые n⁺-подложки представляли собой пластины (диаметром 76 мм, толщиной 350 μm) с удельным сопротивлением в диапазоне ρ_{n+} = 0.5...0.01 Ω·см и ориентированные в направлении (111). В качестве n-слоя выступал эпитаксиальный слой кремния удельным сопротивлением ρ_n=30...50 Ω·см и толщиной 50...60 μm. Высокоомный эпитаксиальный слой не допускал шунтирования тока в подложку. Толщина пленок диэлектрика не превышала 80 нм. В роли токопроводящего слоя выступали пленки алюминия (Al), напыленные электронно-лучевым методом [5]. Толщина Al-пленок не превышала 3 μm. Как и ранее [5; 6], в данной работе исследования проводились на экспериментальной установке, состоящей из источника прямоугольных токовых импульсов амплитудой до 60 А и длительностью до 1 мс, цифрового запоминающего осциллографа и цифрового оптического микроскопа для регистрации процессов «теплового» разрушения систем металлизации.

Экспериментальное исследование деградационных процессов в данной работе проводилось на тестовых структурах по осциллограммам включения $U(t)$, по методике, детально описанной в работах [7; 8]. Динамика температуры дорожки металлизации $T_1(t)$ рассчитывалась по изменению падения напряжения $U(t)$:

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

здесь $R_0=0,88 \Omega$ – сопротивление дорожки металлизации при $T_0=290 \text{ K}$, измеренное методом вольтметра–амперметра; $\alpha = 0,0043 \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент сопротивления алюминия. Полученные осциллограммы включений приведены на рисунке 1 и позволяют контролировать температуру алюминиевой пленки.



Вставка А: Фотография тестовой структуры: «1» – площадки для токовых контактов, «1-12» – контактные площадки для регистрации $U(t)$ с различных участков тестовой структуры.

Ширина тестовой дорожки 75 μm

Вставка В: РЭМ фотография структуры после прохождения импульса тока

Рисунок 1. – Осциллограммы включения $U(t)$, снятые при прохождении одиночного токового импульса тока длительностью $\tau=550 \mu\text{s}$ и амплитудой $6,5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ через структуру Al-Si₃N₄-Si; Толщина пленок: Si₃N₄ – $h_2=0.8 \mu\text{m}$; Al – $h_1=3 \mu\text{m}$. $U(t)$ снималось с площадок № 1 и № 12

Опытным путем установлено, что на анализируемой системе Al-Si₃N₄-Si при развитии деградационных процессов в токоведущем слое на осциллограммах включения U(t) наблюдается резкий рост потенциала (за счет скачка удельного сопротивления Al при плавлении, кривая, рисунок 1). Для оценки возникающих температурных полей напряжений на межфазных границах в работе были проведены расчеты температурных режимов одиночной дорожки алюминиевой металлизации (Al) с подслоем нитрида кремния (система Al-Si₃N₄-Si).

Для оценки температурных полей, возникающих в рассматриваемой структуре при заданных параметрах электрических импульсов использовалось уравнение [8]:

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

Здесь и далее индекс «1» относится к алюминиевой металлизации, «2» – к диэлектрическому подслою, а «3» – к полупроводниковой подложки, h – толщина, λ – теплопроводность, c , d , a – теплоемкость, плотность и температуропроводность соответственно. Из уравнения (2) видно, что динамика нагрева структуры зависит от силы тока, параметров полупроводниковой матрицы, а также размерно-тепловых параметров диэлектрической пленки.

Типичные результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 2. В соответствии с (2) толщина подслоя нитрида кремния заметно влияет на тепловые режимы многослойных систем. Действительно, результаты эксперимента (рисунок 2) показали, что наличие толщины промежуточной пленки нитрида кремния $h_2 = 80$ нм повышает температуру Al-пленки T_1 на 8...15% по сравнению со структурой Al-Si. Это приводит к более раннему перегреву структур при одинаковой плотности тока j . Очевидно, что прогрев дорожек металлизации происходит тем быстрее, чем больше толщина промежуточного полупроводникового слоя.

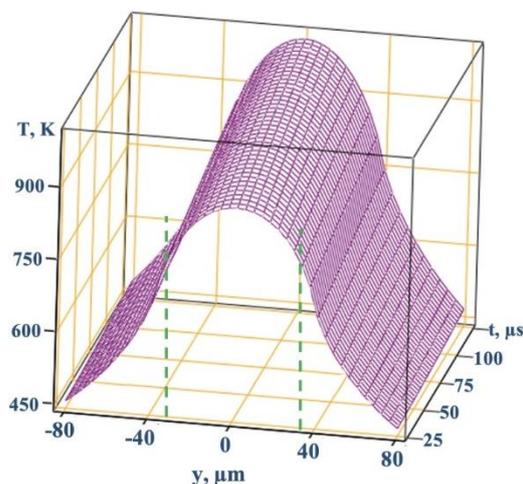


Рисунок 2. – Расчетная зависимость распределения температуры на поверхности структуры Al-Si₃N₄-Si в процессе прохождения импульса тока при $t = 150 \mu\text{s}$ с момента включения и амплитудой $j = 7.1 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ ($I = 16 \text{ A}$). Толщина Al составляет $3 \mu\text{m}$

Расчеты показали, что температурный профиль $T(y,t)$ в направлении поперек дорожки металлизации неоднороден. При высоких значениях с увеличением плотностей тока ($j=(7...9)\cdot 10^{10}$ А/м²) в импульсе перепады $\Delta T(t) = T(0,t) - T(\frac{b}{2},t)$ может достигать на структуре Al-Si₃N₄-Si величины $\Delta T \sim 120$ К.

Очевидно, что столь высокие температурные градиенты и соответственно возникновению термоупругих механических напряжений:

$$s_{ik} = -Kb\{T(r,t) - T_0\}d_{ik}. \quad (3)$$

что может приводить к релаксации напряжений путем пластической деформации и образованию трещин в приповерхностном слое материала, на который нанесена металлическая пленка. Здесь и далее σ_{ik} – тензор напряжений; K – модуль всестороннего сжатия; β – коэффициент теплового расширения; δ_{ik} – тензор Кронекера. Результаты расчета механических напряжений приведены на рисунке 3. Нетрудно видеть, что при амплитуде токового импульса $j = 6.8 \cdot 10^{10}$ А/м² на межфазной границе структуры Al-Si₃N₄ возникающие напряжения превышают предел прочности пленки (пунктир, рисунок 3).

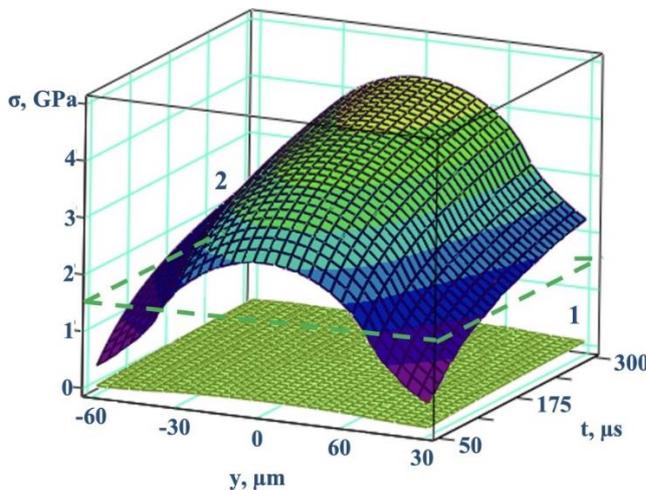
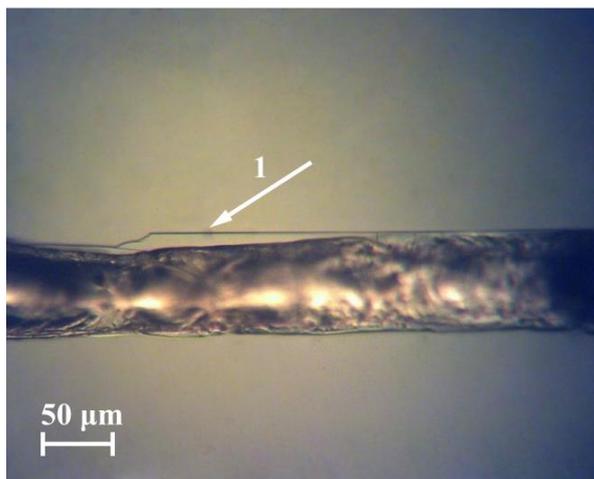


Рисунок 3. – Динамика механического напряжения на поверхности слоя Si₃N₄ (2), Al (1) в процессе прохождения токового импульса $j=6.8 \cdot 10^{10}$ А/м². Длительность импульса тока 300 μs . Пунктирная линия – предел прочности нитрида кремния

При таких условиях в рассматриваемой системе могут развиваться процессы образования трещин (рисунок 4) [8]. При этом наибольший рост величины механических напряжений происходит в течении первых 50...110 μs с момента включения импульса (рисунок 3). В нашем случае, вблизи источника термоудара наряду с появлением трещины (1, рисунок 4) и разрушение нитридной пленки от кремниевой подложки, что связывается нами с высокими термоупругими напряжениями вблизи источника термоудара.



1– трещина в пленке нитрида кремния

Рисунок 4. – Фотография фрагмента системы металлизации с закристаллизованными включениями после процесса миграции в поле градиента температур. Амплитуда прямоугольного импульса тока составляла $j = 7,5 \cdot 10^{10}$ А/м², а длительность – $\tau = 350$ мс.

Проведенные металлографические исследования подтвердили наличие процессов трещинообразования на границе дорожки ($y = \pm b/2$) в пленках нитрида кремния при достижении критических плотностей тока (стрелка 1, рисунок 4).

Таким образом, в работе изучено формирование расплавленных зон ведущего к разрушению межсоединений, лежащих на поверхности тонкой пленки нитрида кремния на кремнии. Обнаружено образование и динамика макроскопических включений по поверхности кристалла в поле градиента температуры при прохождении прямоугольного тока плотностью $j = 4...8 \cdot 10^{10}$ А/м² и длительностью $\tau = 100...1000$ мс. Проведена оценка величины градиента температур вблизи дорожки металлизации, а также характерных времен динамики расплавленных зон под действием температурного градиента. Обнаружено, что после прохождения одиночного импульса тока вся дорожка системы Al-Si₃N₄-Si оказалась оплавлена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aljaghtham M., Celik E. Numerical analysis of energy conversion efficiency and thermal reliability of novel, unileg segmented thermoelectric generation systems. // International Journal of Energy Research. 2021. In print. – DOI: 10.1002/er.6416.
2. You J., Tian D., He C., Zhao Q., Yang Z., Zhang D., Yan G. A method to evaluate the influence of different substrate on stress mismatch induced deformation in MEMS accelerometer // 2015 IEEE 10th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems NEMS 2015. Article № 7147458. – P. 421–425. – DOI: 10.1109/NEMS.2015.7147458.
3. Sarma S., Singh S., Garg A. Laminated Ag and Ag/CNT nanocomposite films as sensing element for efficient thin film temperature sensors. // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. – 2021. – Iss. 172. Article № 108876. – DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108876.

4. Skvortsov A.A., Koryachko M.V., Skvortsov P.A., Luk'yanov M.N. On the Issue of Crack Formation in a Thin Dielectric Layer on Silicon under Thermal Shock. //Journal of Materials Engineering and Performance. 2020. Vol. 29. Iss. 7. P. 4390-4395. DOI: 10.1007/s11665-020-04925-4
5. Скворцов А.А., Корячко М.В., Рыбакова М.Р. Термомиграция расплавленных зон по поверхности кремния в условиях теплового удара. // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46, № 8. – С. 21–24. – DOI: 10.21883/PJTF.2020.08.49303.18210
6. Корячко М. В., Скворцов А. А., Пшонкин Д. Е., Володина О. В. Анализ процесса разрушения алюминия на поверхности кремния при электрическом взрыве проводника // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 48, № 9. – С. 3–6. – DOI:10.21883/pjtf.2022.09.52441.19114.
7. Skvortsov A. A., Zuev S. M., Koryachko M. V., Glinskiy V. V. Thermal shock and degradation of metallization systems on silicon // Microelectronics International. – 2016. – Vol. 33, iss. 2. – 2016. – P. 102–106. – DOI: 10.1108/MI-05-2015-0049.
8. Skvortsov A. A., Koryachko M. V., Skvortsov P. A., Luk'yanov M. N. On the Issue of Crack Formation in a Thin Dielectric Layer on Silicon under Thermal Shock // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – 29 (7). – P. 4390–4395. – DOI: 10.1007/s11665-020-04925-4.