

06.1

Деградационные процессы в системе алюминий–кремний при импульсных электрических воздействиях

© А.А. Скворцов, А.М. Орлов, А.А. Саланов

Ульяновский государственный университет
E-mail: scvor@sv.uven.ru

Поступило в Редакцию 11 мая 2001 г.

Рассматриваются тепловые условия функционирования слоя металлизации, нанесенного на монокристаллическую подложку кремния, при пропускании через нее одиночных импульсов тока плотностью $j = (1 \dots 8) \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью $\tau = 50 \dots 800 \text{ }\mu\text{s}$. Установлены механизмы необратимой деградации пары алюминий–кремний при импульсном токовом воздействии, проявляемые в контактном плавлении анализируемой структуры и локальном оплавлении слоя металлизации.

Предложены методы идентификации этих явлений и способы определения численных значений критических плотностей тока j_k . Показано, что зависимость j_k от длительности токового импульса подчиняется степенной зависимости $j_k \sim 1/\sqrt[4]{\tau}$. Обнаружена генерация линейных дефектов в области максимальных температурных градиентов тестовой структуры при прохождении одиночных токовых импульсов $j \geq 5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и $\tau \geq 200 \text{ }\mu\text{s}$.

Известно, что разрушение контактов металл–полупроводник и слоев металлизации приводит к необратимому отказу полупроводниковых структур [1–3]. Однако этому процессу предшествуют электростимулированные деградационные явления, которые, как правило, начинаются на перегибах металлических пленок, местах локализации механических и структурных дефектов, на границах контактирующих фаз. Причем импульсные электрические воздействия представляются нам особенно важными, поскольку активизируемые ими электротранспортные процессы приводят (за $10 \dots 100 \text{ }\mu\text{s}$ [2,3]) к необратимой деградации контактной системы. Поэтому целью данной работы является исследование деградационных процессов в наиболее распространенной алюминий–кремниевой (Al–Si) системе при прохождении прямоугольных токовых

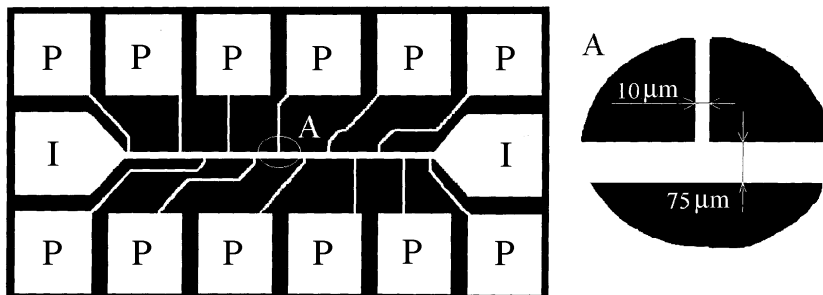


Рис. 1. Вид тестовой структуры с 12 потенциальными P и 2 токовыми I контактами. На вставке А: фрагмент тестовой структуры. Увеличение $21\times$.

импульсов плотностью $1 \cdot 10^{10} \leq j \leq 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью $100 \leq \tau \leq 800 \mu\text{s}$.

Исследования температурных режимов работы анализируемых структур проводились по методике [4,5]. В качестве полупроводниковой подложки использовались легированные фосфором кремниевые пластины ориентации [111] с удельным сопротивлением $20\text{--}30 \Omega \cdot \text{cm}$ и толщиной $350 \mu\text{m}$. Такие подложки практически не шунтировали слои металлизации, что значительно облегчало анализ процесса перераспределения тепловых потоков в исследуемой структуре.

Алюминиевая пленка наносилась на прогретую до 473 K поверхность кремниевой пластины методом электронно-лучевого испарения при рабочем давлении $7 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$ со скоростью 2 nm/s . Время напыления не превышало 40 min . После напыления методами контактной фотолитографии изготавливались структуры, изображенные на рис. 1.

Анализ температурных режимов функционирования осуществлялся по осциллограммам включения $U(t)$, снимаемым с различных потенциальных зондов тестовой структуры. При этом динамика температуры $\Delta T = T - T_0$ контролируемого участка тестовой структуры легко оценивалась по изменению $U(t)$:

$$\Delta T(t) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{U(t)}{U_0} - 1 \right), \quad (1)$$

где $\alpha(\text{K}^{-1})$ — температурный коэффициент сопротивления; $U_0 = IR_0$; $I(\text{A})$ — протекающий через структуру ток; $R_0 (\Omega)$ — сопротивление структуры при $\Delta T = 0$.

О происходящих в системе изменениях в пределах токового импульса судили по динамике температуры алюминиевой пленки, связанной с параметрами полупроводниковой матрицы уравнением [6]:

$$\Delta T = T_t - T_0 = \frac{I^2 \bar{R}}{dSC} \sqrt{\frac{t}{a}}. \quad (2)$$

Здесь I — амплитуда токового импульса; S (m²) — площадь теплопередачи контакта металл-полупроводник; R (Ω) — сопротивление металлизированной дорожки; C (J/(kg·K)), a (m²/s), d (kg/m³) — теплоемкость, температуропроводность и плотность кремния соответственно. Черта над соответствующим символом означает среднеинтегральное по температуре его значение.¹

Предсказываемая уравнением (2) зависимость хорошо согласуется с экспериментом до плотностей тока порядка $4 \cdot 10^{10}$ A/m². В этом случае истинные j не достигают критических значений,² на что указывает монотонность изменения $U(t)$ экспериментальных осциллограмм (1, рис. 2). Следует также отметить, что возможная деградация локальных микроучастков алюминия не вносит заметных тепловых возмущений в структуру при прохождении импульсов тока докритических значений j .

Большие j первоначально изменяют структуру локальных участков токопроводящего слоя. Это проявляется в образовании жидкой прослойки за счет контактного плавления компонентов на межфазной границе Al с Si при достижении эвтектической температуры (850 К). Регистрируемые при этом осциллограммы позволяют не только определять общие временные рамки деградационных процессов, но и конкретизировать переходящие этапы контактного плавления и оплавления алюминиевой дорожки при прохождении токового импульса.

Действительно, постепенное образование расплавленной прослойки влечет за собой перераспределение тока в пользу жидкой фазы. Ее формирование начинается с эвтектической температуры и активно продолжается при более высоких T . Перераспределение тока между проводящими фазами сопровождается снижением j , что проявляется на

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

² К критической плотности тока j будем относить такую плотность, при которой начинаются необратимые разрушения в системе металл-полупроводник и слоях металлизации (контактное плавление, оплавление, обрывы и т.д.) в процессе прохождения импульса тока.

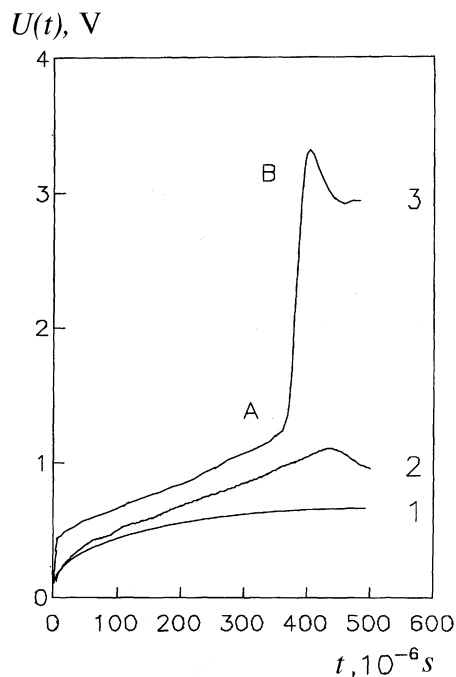


Рис. 2. Вид осциллограмм включения при прохождении одиночного токового импульса длительностью $500 \mu\text{s}$ и амплитудой: 1 — $4.5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, 2 — $5.0 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ (контактное плавление без оплавления Al); 3 — $5.6 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ (с оплавлением Al). Расстояние между потенциальными зондами 3.5 mm , толщина алюминиевой пленки $3 \mu\text{m}$.

осциллограммах включения сбросом потенциала $U(t)$ в районе $440 \mu\text{s}$ (2, рис. 2).

При больших плотностях тепловых потоков, обеспечиваемых повышенными значениями j , в деградационных процессах начинает преобладать разрастающееся оплавление локальных участков слоя металлизации. Это сопровождается резким увеличением потенциала $U(t)$, причем угол наклона этого фрагмента осциллограммы (участок AB на кривой 3, рис. 2) определяется скоростью оплавления контролируемого участка дорожки металлизации. Полное ее оплавление соответствует

максимальному значению скачка потенциала, величина которого связана с различием электропроводностей твердого ρ_s и жидкого $\rho_l = 2.2\rho_s$ алюминия [7]. Последующее развитие событий, связанных со сбросом потенциала $U(t)$, контролируется контактным плавлением Si в расплавленной пленке Al. Процесс зарождения жидкой фазы при повышенных j начинается в нескольких наиболее "слабых местах" структуры, что четко фиксируется методами оптической микроскопии. Дискретное зарождение расплавленных зон, сопровождаемое всплеском потенциала, наблюдалось нами и ранее на структурах Al-Si с высокоомными подслоями аморфных полупроводников [4].

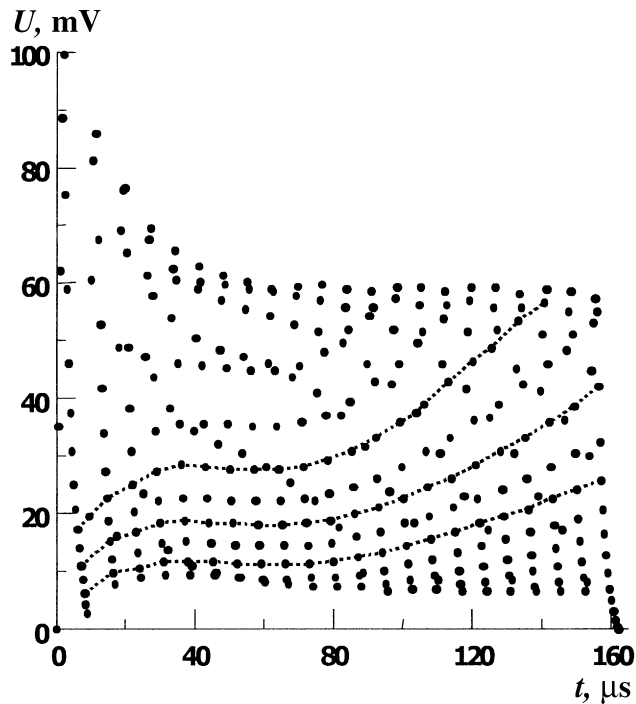


Рис. 3. Осциллограмма включения при прохождении одиночного токового импульса длительностью $160 \mu\text{s}$ и амплитудой $6 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$.

При плотностях токов больших $7 \cdot 10^{10}$ А/м², особенно в многослойных структурах, осциллограммы включения на этапе необратимых изменений носят сильно осциллирующий характер. На кривой $U(t)$ наблюдаются броски и спады потенциала с отчетливо проявляющейся тенденцией его уменьшения из-за контактного плавления Si. Осцилляции плохо воспроизводимы, хотя и сохраняют общую тенденцию [4].

Установлено [4], что подобные изменения связаны с многочисленными разрывами сворачивающейся пленки и параллельно протекающими процессами слияния оплавленных зон под действием сил электро- и термопереноса. Хаотичность изменения потенциала в этом случае определяется худшей адгезией в многослойной системе и, как следствие, хаотичностью в образовании оплавленных зон.

В отличие от многослойных систем образование локальных жидких зон в структуре Al-Si, обладающей лучшей адгезией, носит более упорядоченный характер. Изменения осциллирующего потенциала в этом случае происходят на одних и тех же местах оплавленной зоны. Это должно приводить к упорядоченному расположению точек осциллирующего потенциала.

Действительно, на экспериментальных осциллограммах, снятых со структуры Al-Si после достижения температуры плавления алюминия, можно видеть вклад всех локальных оплавляющихся зон (три из них соединены пунктиром на рис. 3). Более того, число "пунктиров" соответствует количеству зарождающихся локальных зон, на участке слоя металлизации с которого снимается сигнал $U(t)$.

Большую практическую значимость представляют собою численные значения критических плотностей тока, приводящих к необратимым процессам разрушения. Они легко могут быть оценены по уравнению (2), если начало разрушения связывать с моментом отклонения потенциала от параболического закона роста U , а следовательно, и T :

$$j_k = \sqrt{\frac{(\Delta T)S\bar{C}d}{(bh)^2\bar{R}}} \sqrt[4]{\frac{\bar{a}}{\tau}}. \quad (3)$$

Видно, что зависимость критической плотности тока j_k от длительности импульса должна укладываться на прямую в координатах $j_k - 1/\sqrt[4]{\tau}$, что хорошо согласуется с экспериментом (рис. 4). При этом начало разрушения тестовой структуры должно наступать тем быстрее, чем больше плотность тока.

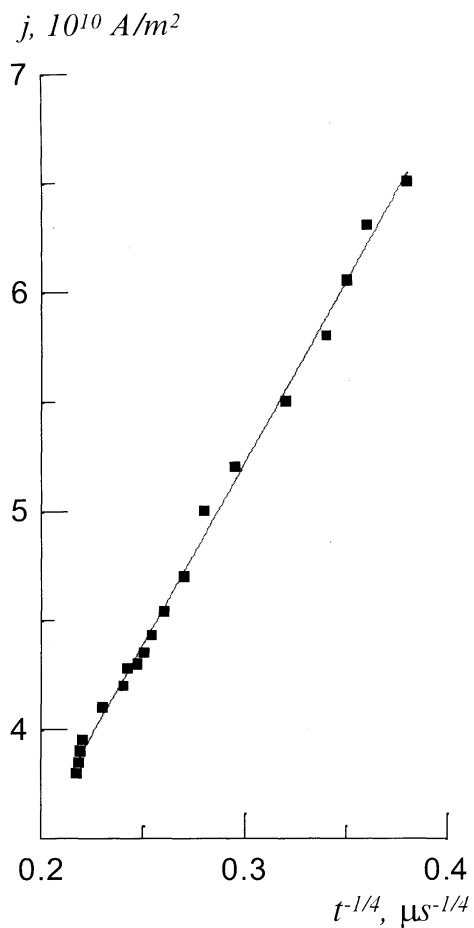


Рис. 4. Зависимость критической плотности тока от длительности токового импульса системы Al-Si.

Сопоставление экспериментальных данных (рис. 4) с уравнением (3) позволяет оценить температуру T_k , соответствующую началу необратимых изменений в контактной паре Al-Si при импульсном воздействии тока. Расчеты показывают, что она соответствует эвтектическому плав-

лению компонентов системы ($T_k = 870$ К), при расчетах использовались экспериментальные температурные зависимости параметров [8,9]:

$$d = \frac{2328}{(1 + 7.5 \cdot 10^{-6} \cdot T)} \quad (\text{kg/m}^3),$$

$$C = 800 + 8 \cdot 10^{-2} \cdot T - 1.5 \cdot 10^3 \cdot T^{-2} \quad (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})),$$

$$\lambda = 12 \cdot 10^4 \cdot T^{-1.2} \quad (\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})),$$

$$\alpha = 4.3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{K}^{-1}).$$

Тепловой удар на поверхности кремния способствует образованию сильных градиентов температур, приводящих к значительным механическим напряжениям. Это способствует образованию линейных дефектов в области максимальных градиентов ($\sim 10^7$ К/см) даже после прохождения одиночного токового импульса $j = 5 \cdot 10^{10}$ А/см² и длительности $\tau = 100$ мкс.

Действительно, проведенные нами металлографические исследования показали наличие дислокационных ямок травления на поверхности кремния после удаления слоя металлизации. Снятие алюминиевой пленки производилось в растворах на основе ортофосфорной кислоты, а выявление дислокационных ямок травления на поверхности кремния осуществлялось с помощью стандартного СР-травителя.

Таким образом, деградационные процессы в структуре Al-Si при импульсном токовом возмущении обусловлены активно протекающими процессами фазообразования. Выявлены основные этапы развития этого вида деградации. Осциллографическими методами разделены и проанализированы контактное плавление и оплавление металла на поверхности Si. Определены области проявления этих эффектов. Экспериментально установлены начальные этапы разрушения слоя металлизации при различных j , идентифицируемых нами как критические плотности тока. Обнаружено, что прохождение одиночного токового импульса длительностью 100 мкс и амплитудой $5 \cdot 10^{10}$ А/м² способствует образованию линейных дефектов в области максимальных градиентов структуры. Особенности проявления этого эффекта нуждаются в специальном анализе и будут рассмотрены в ближайшее время.

Список литературы

- [1] *Валиев К.А., Орликовский А.А., Васильев А.Г., Лукичев В.Ф.* // Микроэлектроника. 1990. Т. 19. № 2. С. 116–131.
- [2] *Burggraff P.* // Sol. St. Tech. 2000. V. 43. N 1. P. 63–66.
- [3] *Wang H., Fischman G.S.* // J. Appl. Phys. 1994. N 3. P. 1557–1562.
- [4] *Орлов А.М., Костишко Б.М., Скворцов А.А., Пирогов А.В.* // Изв. РАН. Неорганические материалы. 1996. Т. 32. № 6. С. 277–280.
- [5] *Орлов А.М., Скворцов А.А., Костишко Б.М.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2000. № 4. С. 64–66.
- [6] *Орлов А.М., Пирогов А.В., Емельянова Т.Г.* // Изв. РАН. Неорганические материалы. 1993. Т. 29. № 11. С. 1559–1562.
- [7] *Вилсон Д.Р.* Структура жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1972. 246 с.
- [8] *Справочник по электротехническим материалам* / Под ред. Ю.В. Корещкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 3. 728 с.
- [9] *Охотин А.С., Пушкарский А.С., Горбачев В.В.* Теплофизические свойства полупроводников. М.: Атомиздат, 1972. 187 с.