

06

К вопросу диагностики деградационных процессов в системе алюминий–кремний при импульсных электрических воздействиях

© А.А. Скворцов, А.М. Орлов, В.В. Рыбин

Ульяновский государственный университет
E-mail: scvortsovaa@ulsu.ru

Поступило в Редакцию 18 июля 2005 г.
В окончательной редакции 17 октября 2005 г.

Проанализированы тепловые режимы работы, нанесенной на кремниевую пластину дорожки металлизации при прохождении через нее прямоугольного импульса тока амплитудой $j < 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью 100–1000 μs . Предложена методика, позволяющая проводить диагностику контактных систем и определять их область безопасной работы.

PACS: 81.15.Pq

Разрушение слоев металлизации и контактов металл–полупроводник является последним звеном необратимого отказа полупроводниковых структур. Это, по нашему наблюдению и мнению других авторов [1–3], происходит на перегибах пленок или в дефектных ее местах, связанных с микротрещинами и микропорами. При их отсутствии критическим становится вымывание вещества, проявляющееся особенно ярко на границах зерен. Указанные процессы активизируются токами повышенной плотности, как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы контактов металл–полупроводник. Импульсные воздействия могут приводить не только к образованию жидкой фазы на поверхности кристалла, но и к полному разрушению даже бездефектных участков токопроводящих систем. Известно [3,4], что прохождение даже одиночного импульса длительностью до 100 μs и амплитудой $8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ может приводить к дефектообразованию и полной деградации кристалла. Поэтому рассматриваемые вопросы диагностики

деградационных процессов в структурах металл–полупроводник представляются важными и актуальными.

Несмотря на это, отсутствует детальный анализ влияния длительности и амплитуды токового импульса на развитие деградационных процессов в контактной системе металл–полупроводник и методики определения критических режимов работы подобных структур. Поэтому представленная статья и посвящена вопросу диагностики деградационных процессов в системе металл–полупроводник при воздействии прямоугольных импульсов тока.

Экспериментальное исследование тепловых режимов осуществлялось на системе алюминиевая пленка–кремниевая подложка (Al–Si). В качестве полупроводниковой подложки использовались кремниевые пластины (Si) *n*-типа (толщиной $450\ \mu\text{m}$ и удельным сопротивлением $10\ \Omega\cdot\text{cm}$) с напыленным алюминиевым слоем толщиной. Для регистрации температурных изменений в приповерхностных слоях полупроводника на поверхности кремния формировалась тестовая структура [3–6] в виде дорожки алюминиевой металлизации (Al). Через нее пропускались прямоугольные импульсы с осциллографической регистрацией $U(t)$. Полученные таким образом осциллограммы $U(t)$ через интерфейс КОП-RS232 записывались в ЭВМ. Это позволяло анализировать температурные режимы функционирования границы раздела металл–полупроводник (рис. 1):

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{U(t)}{IR_0} - 1 \right). \quad (1)$$

Здесь $R_0 = 0.78\ \Omega$ — сопротивление дорожки металлизации при $T_0 = 290\ \text{K}$; α — температурный коэффициент сопротивления металла.

Для расчета температурного поля, создаваемого прямоугольным фрагментом металлизации длиной l и шириной b (причем $l \gg b$), использовались полученные в работе [5] уравнения, описывающие динамику $T(y, t)$ на поверхности полупроводника после включения импульса тока вдали от концов слоя металлизации:

$$T(y, t) - T_0 = \frac{I^2 R}{2\pi\lambda l b} \left\{ \left(\frac{b}{2} - y \right) E_1 \left(\frac{(b/2 - y)^2}{4at} \right) + \left(\frac{b}{2} + y \right) E_1 \left(\frac{(b/2 + y)^2}{4at} \right) \right\} + \frac{I^2 R \sqrt{at}}{\sqrt{\pi\lambda l b}} \left\{ \Phi \left(\frac{b/2 - y}{\sqrt{4at}} \right) + \Phi \left(\frac{b/2 + y}{\sqrt{4at}} \right) \right\}. \quad (2)$$

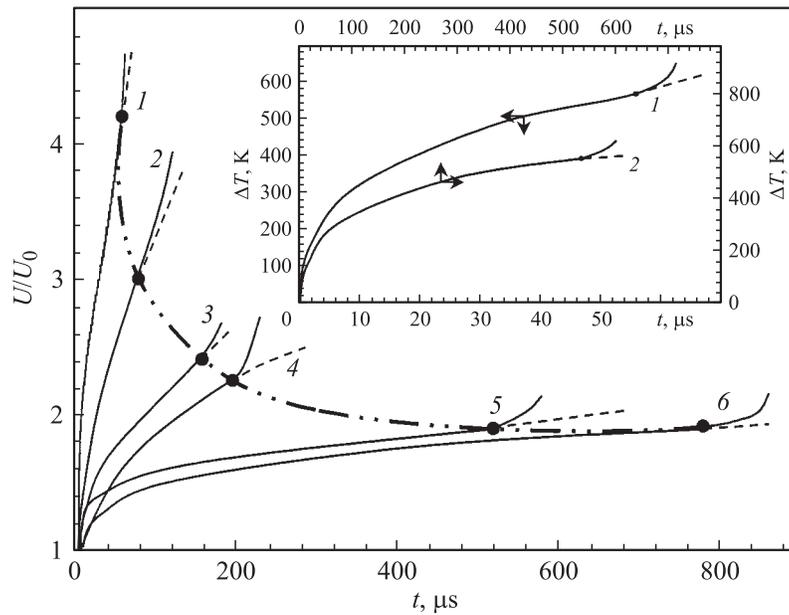


Рис. 1. Вид осциллограмм включения, сопровождающих деградационные процессы в системе Al–Si, при прохождении через структуру одиночного токового импульса амплитудой: 1 — $j = 8.8 \cdot 10^{10}$ A/m²; 2 — $8.6 \cdot 10^{10}$; 3 — $8.2 \cdot 10^{10}$; 4 — $6.4 \cdot 10^{10}$; 5 — $6.6 \cdot 10^{10}$; 6 — $6.1 \cdot 10^{10}$. На вставке: динамика температуры $\Delta T(t) = T - T_0$ на поверхности кремния при прохождении одиночного токового импульса амплитудой: 1 — $j = 8.8 \cdot 10^{10}$ A/m²; 2 — $6.6 \cdot 10^{10}$.

Здесь $E_1(z) = \int_z^\infty \frac{\exp(-\xi)}{\xi} d\xi$ — интегральная экспонента; $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \times \int_0^z \exp(-\xi^2) d\xi$; координата z отсчитывается от середины дорожки металлизации вдоль проведенного к ней перпендикуляра; I, τ ($t < \tau$) — амплитуда и длительность прямоугольного импульса соответственно; R, a, λ — среднеинтегральные (по температуре) значения сопротивления дорожки металлизации, коэффициентов температуропроводности и теплопроводности кремния соответственно.

Следует подчеркнуть, что из последнего выражения при его усреднении по y и устремлении ширины дорожки b к бесконечности можно получить динамику температуры поверхности [5]:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{IU(t)}{\lambda lb} \sqrt{ta}. \quad (3)$$

Это соотношение целесообразно использовать в случае малых времен нагрева либо для широких дорожек, когда размер прогреваемой области сравним с шириной тестовой структуры b . Во всем исследуемом нами интервале длительностей $\tau = (100-1000 \mu s)$ и плотностей $j = (2-8) \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ прямоугольных токовых импульсов максимальная глубина прогрева $z_0 = \sqrt{a\tau}$ не превышала $140 \mu m$, что удовлетворяло условиям полубесконечности и позволяло использовать (3) при анализе деградационных процессов на межфазной границе полупроводник–металл.

Определяемое уравнениями (2) и (3) монотонное изменение потенциала, хорошо согласующееся с экспериментом (рис. 1), резко меняется (возрастает) с началом развития деградационных процессов. Следовательно, осциллограммы $U(t)$ позволяют диагностировать не только благоприятные температурные режимы работы контакта, но и все этапы развития деградационных процессов, четко фиксируемых по характеру отклонения осциллограмм $U(t)$ от монотонной зависимости (точки на рис. 2).

Результатами многочисленных экспериментов установлено, что начало деградационных процессов во всем исследуемом интервале $j = (2-8) \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и $\tau = (100-1000 \mu s)$ связано с контактным плавлением в системе металл–полупроводник* (см. вставку, рис. 2), осложняемым в дальнейшем** оплавлением алюминия. При этом процесс разрушения начинается тем быстрее, чем больше плотность тока.

Если начало разрушения (подстрочный индекс „k“) связывать с моментом отклонения потенциала $U(t)$ от монотонного роста (см. вставку, рис. 2), то используя серию осциллограмм можно определить область безопасной работы контакта, ограниченной свехру штрихпунктирной

* Начальная температура контактного плавления связана с эвтектической температурой, которая для системы Al–Si соответствует $T_e = 850 \text{ K}$ [7].

** Если температура достигает температуры плавления слоя металлизации.

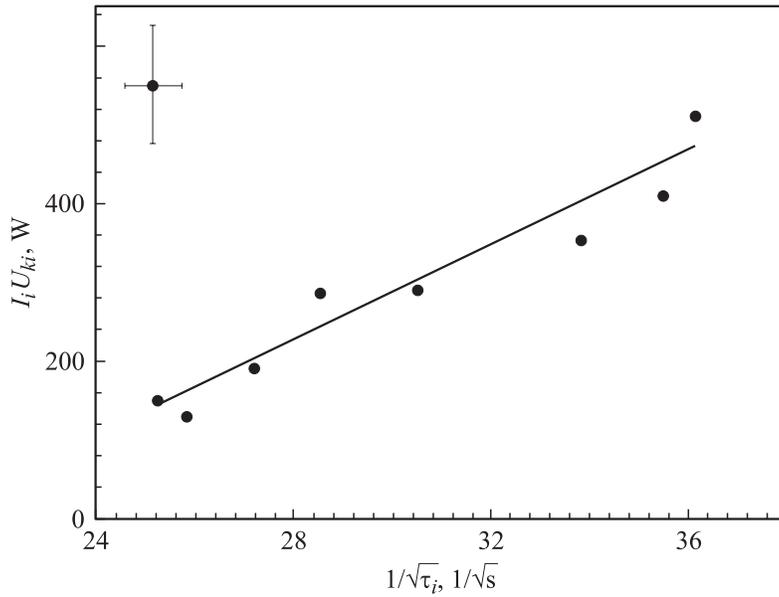


Рис. 2. Зависимость критических значений $I_i U_{ki}$ от длительности импульса τ_i .

линией на рис. 2:

$$U_{ki} = \frac{\lambda b l}{\sqrt{a}} \frac{\Delta T_k}{I_i \sqrt{\tau}} = \frac{\gamma}{I_i} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_i}}. \quad (4)$$

Здесь $\Delta T_k = T_e - T_0$, а взаимно связанные значения U_{ki} , I_i и τ_i обозначены подстрочным индексом „i“, соответствующим моменту разрушения структуры (рис. 1).

Эта область определяется параметром

$$\gamma = \frac{\lambda b l}{\sqrt{a}} \Delta T_k = U_{ki} \cdot I_i \sqrt{\tau_i} = P_{ki} \sqrt{\tau_i}, \quad (5)$$

являющимся аналогом обобщенной переменной в задачах теплопроводности [7]. Численное значение обобщенного параметра γ соответствует наклону прямой (рис. 2), построенной в координатах $(I_i \cdot U_{ki}) = f(\tau^{-0.5})$, и служит критерием деградационной стойкости слоев металлизации.

Сопоставление результатов эксперимента (рис. 2) с уравнением (4) позволяет, с учетом литературных данных для a и λ [8,9], оценить температуру ΔT_k , отвечающую за начало необратимых изменений в контактной паре Al–Si при импульсном воздействии тока. Расчеты показывают, что ΔT_k соответствует эвтектическому плавлению компонентов в зоне контакта, что определяет постоянство $\gamma = 5.7(VA\sqrt{s})$. Следовательно, если комбинация определяющих γ параметров ($\tau_i = 85-1000 \mu s$ и соответственно $Q_{ki} = P_{ki}\tau_i = \gamma\sqrt{\tau_i} = 50-170 \text{ mJ}$) достигает приведенного здесь значения γ , то в рассматриваемой системе начинают развиваться необратимые деградационные процессы.

Таким образом, в работе проведено исследование деградационных процессов в контактной системе металл–полупроводник. Экспериментально установлены начальные этапы разрушения слоя металлизации при различных длительностях τ_k и амплитудах прямоугольного импульса тока j_k (критические значения параметров). Предложена методика диагностики контактных систем и определения их области безопасной работы по критическим значениям j_k и τ_k .

Работа поддержана грантом РФ молодых российских ученых–докторов наук МД-1711.2005.2.

Список литературы

- [1] *Wayner P.* // Byte. 1994. № 8. P. 67–74.
- [2] *Мильвидский М.Г.* // Изв. вузов. Материалы электронной техники. № 1. 2000. С. 4–14.
- [3] *Орлов А.М., Костишко Б.М., Скворцов А.А.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1997. № 1. С. 80–84.
- [4] *Скворцов А.А., Орлов А.М., Саланов А.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 19. С. 76–84.
- [5] *Орлов А.М., Скворцов А.А., Литвиненко О.В.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 6. С. 78–81.
- [6] *Глазов В.М., Земсков В.С.* Физико-химические основы легирования полупроводников. М.: Наука, 1967. 371 с.
- [7] *Корнев Б.Г.* Задачи теплопроводности и термоупругости: решения в Бесселевых функциях. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1980. 400 с.
- [8] *Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.* М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [9] *Охотин А.С., Пушкарский А.С., Горбачев В.В.* Теплофизические свойства полупроводников. М.: Атомиздат, 1972. 187 с.