

06

Деградационные процессы в системах металлизации на кремнии при нестационарных электрических воздействиях

© А.А. Скворцов, В.В. Рыбин, И.П. Романенко

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

Поступило в Редакцию 14 марта 2006 г.

Проанализированы температурные режимы работы слоя алюминиевой металлизации, нанесенной на кремниевую пластину, при прохождении через нее токового импульса с линейно нарастающим во времени фронтом $\frac{\Delta I}{\Delta t} \leq 1.5 \cdot 10^{14} \text{ A}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Произведен расчет динамики температуры при прохождении подобных импульсов и осуществлена его экспериментальная проверка. Обнаружены деградационные процессы в исследуемых структурах, связанные с образованием жидкой фазы на границе раздела металл-полупроводник и плавления слоя металлизации в условиях нестационарного нагрева.

PACS: 81.05.-t

Изучению воздействия токовых импульсов на фольги, а также тонкие пленки, нанесенные на полупроводниковые подложки, посвящено достаточное число работ [1–9]. При анализе тепловых процессов в контактных системах металл–полупроводник большое внимание, как правило, уделяется моделированию тепловых полей и анализу деградационных процессов, связанных с перегревом структур (определение критических значений параметров) [3–8]. При этом большая часть исследований проведена при воздействии либо постоянных токов, либо прямоугольных токовых импульсов. В реальных же условиях приходится иметь дело с импульсами более сложной формы, когда малейшее отклонение от заданного режима работы может привести к активному дефектообразованию и деградации не только слоя металлизации, но и контакта металл–полупроводник. Вот почему цель данной работы — исследование деградационных процессов, а также экспериментальное

определение области безопасной работы систем металлизации на кремнии при воздействии токовых импульсов с линейно нарастающим фронтом.

При проведении опытов использовалось экспериментальное оборудование, детально описанное в [8,9]. Для формирования токовых импульсов с линейно нарастающим фронтом применялся специально разработанный генератор, формирующий импульсы с длительностью линейного участка 80–340 μs , максимальной плотностью тока до $5.7 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$.

Экспериментальное исследование тепловых режимов осуществлялось на системах Si–Al. Как и ранее [8,9], в качестве полупроводниковой матрицы использовались кремниевые пластины n -типа (толщиной 450 μm и удельным сопротивлением $10 \Omega \cdot \text{cm}$) с напыленным алюминиевым слоем толщиной 3–5 μm . Регистрация температурных изменений в приповерхностных слоях полупроводника осуществлялась с помощью тестовой структуры [8,9] в виде дорожки алюминиевой металлизации. Через нее пропускались импульсы тока с осциллографической регистрацией $U(t)$. Зная температурную зависимость сопротивления и закон изменения тока во времени ($I(t) = \eta t$), нами оценивалась температура границы раздела металл–полупроводник в процессе прохождения импульса

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0 = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{U(t)}{I(t)R_0} - 1 \right). \quad (1)$$

Здесь $R_0 = 0.2 \Omega$ — сопротивление дорожки металлизации при $T_0 = 290 \text{ K}$ (α — температурный коэффициент сопротивления Al).

Для расчета температурного поля, создаваемого прямоугольным фрагментом металлизации длиной l и шириной b (при условии $l \gg b$), использовалось, как и в [8], уравнение, описывающее динамику $T(y, t)$ на поверхности полупроводника вдали от концов слоя металлизации после включения прямоугольного импульса тока:

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

Здесь $E_1(z) = \int_z^{\infty} \frac{\exp(-\xi)}{\xi} d\xi$ — интегральная экспонента; $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\xi^2) d\xi$; координата y 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. Поскольку токовый импульс был не прямоугольным, он разбивался на интервалы ($\Delta\tau$), в пределах которых $I(t)$ и мощность $P(t)$ считались постоянными, после чего производился расчет по уравнению (2). Экспериментальные результаты и расчет температуры в центре дорожки приведены на рис. 1. Они связаны с динамикой нагрева и охлаждения структуры при прохождении токового импульса с линейно нарастающим фронтом. При используемых плотностях тока активной деградации структуры не происходит, поскольку мгновенные температуры контакта не превышают 750 К.

Деградационные процессы начинают проявляться при достижении в системе металл–полупроводник „критических“ температур, связанных с температурами плавления эвтектики Al–Si (577°C; рис. 2, 1) и алюминия (661°C; рис. 2, 2–4 и вставка).

Как и в случае с прямоугольными токовыми импульсами [9], здесь также присутствует участок, связанный с образованием жидкой прослойки при достижении эвтектической температуры (рис. 2, 1). Нетрудно видеть, что образование эвтектики сопровождается уменьшением потенциала на осциллограммах $U(t)$, связанных с увеличением сечения токопроводящего канала за счет образованной жидкой пленки [9].

Оплавление пленки алюминия на осциллограммах $U(t)$ четко фиксируется по резкому скачку потенциала (участок AB на рис. 2), связанному с увеличением удельного сопротивления алюминия при его плавлении. Плавление металлизации в этом случае носит фрагментарный характер. Увеличение токовых нагрузок вплоть до $j_{\max} = 5.4 \cdot 10^{10}$ А/м² приводит к оплавлению всей токопроводящей структуры. Характер оплавления становится островковым: наблюдается сворачивание расплавленного металла в капли, их перемещение вдоль линий напряженности электрического поля, обрывы токопроводящей

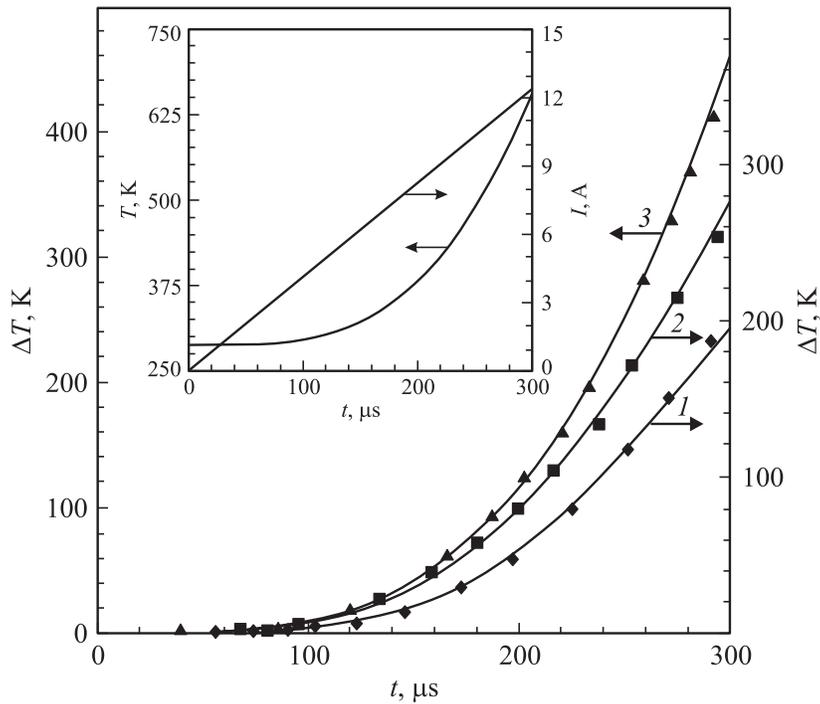


Рис. 1. Динамика изменения температуры поверхности кремния при пропускании импульса с длительностью линейного участка $300 \mu\text{s}$ и амплитудой тока: 1 — $2.45 \cdot 10^{10}$, 2 — $2.95 \cdot 10^{10}$, 3 — $3.33 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ (сплошные кривые — расчет по уравнению (2), маркеры — экспериментальные данные). На вставке — закон изменения тока и динамика температуры поверхности кремния при пропускании импульса амплитудой $j_{\text{max}} = 3.33 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$.

структуры и т.д. К сожалению, быстротечность процессов разрушения не позволяет зафиксировать динамику перемещения расплавленных зон по поверхности полупроводника, однако подобные процессы отражаются на осциллограммах включения (см. вставку, рис. 2) резкими всплесками потенциала, подчеркивающими нестационарность процесса.

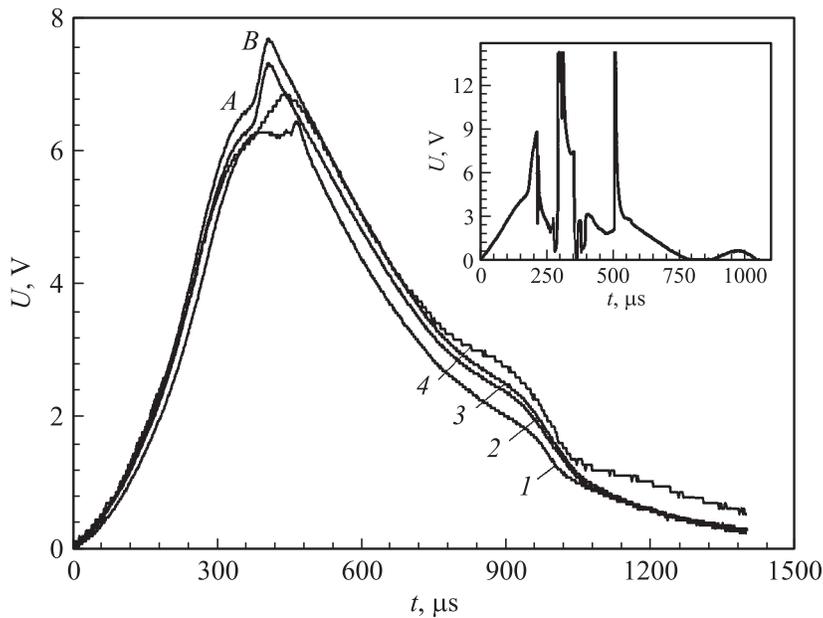


Рис. 2. Осциллограммы включения, снятые с участка тестовой структуры системы Al–Si длиной 2,99 mm при пропускании линейно нарастающего импульса тока при: 1 — $j_{\max} = 3.9 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, 2 — $4.2 \cdot 10^{10}$, 3 — $4.5 \cdot 10^{10}$, 4 — $4.6 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$. Толщина пленки алюминия $5 \mu\text{m}$. На вставке: вид осциллограммы включений при пропускании линейно нарастающего импульса тока при $j_{\max} = 5.4 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$.

Таким образом, в работе проанализированы температурные режимы работы системы металл–полупроводник, при прохождении через нее импульса тока с линейно нарастающим во времени фронтом. Произведен расчет динамики температуры при прохождении подобных импульсов и осуществлена его экспериментальная проверка. Изучены деградационные процессы в рассматриваемых структурах, определяемые процессами фазообразования на границе раздела металл–полупроводник.

Работа поддержана грантом президента РФ поддержки ученых — молодых докторов наук № МД-1711.2005.2.

Список литературы

- [1] *Электрический взрыв проводников* / Под ред. А.А. Рухадзе, И.С. Шпигеля. М.: Мир, 1965. 360 с.
- [2] *Абрамов И.И., Ивкин В.М., Горбач В.Б.* // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. В. 4. 1992. С. 28–30.
- [3] *Грехов И.В., Шулекин А.Ф., Векслер М.И.* // ФТП. 1998. Т. 32. В. 6. С. 743–747.
- [4] *Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В.* Методы расчета тепловых режимов приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
- [5] *Мельник В.Н.* // Электронное моделирование. 1992. Т. 14. № 3. С. 91–93.
- [6] *Петросяц К.О., Рябов Н.И.* // Электронная техника. Микроэлектроника. 1980. В. 5(89). С. 60–65.
- [7] *Велмре Э.Э., Фрейдин Б.П.* // Электронное моделирование. 1983. № 1. С. 73–76.
- [8] *Скворцов А.А., Орлов А.М., Рыбин В.В.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 6. С. 18–23.
- [9] *Скворцов А.А., Орлов А.М., Саланов А.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 19. С. 76–84.