

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  $\mu\text{s}$ , 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  $\mu\text{m}$  и удельным сопротивлением  $10 \Omega \cdot \text{cm}$ ) с напыленным алюминиевым слоем толщиной 3–5  $\mu\text{m}$ . 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  $T_0 = 290 \text{ K}$  ( $\alpha$  — 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:

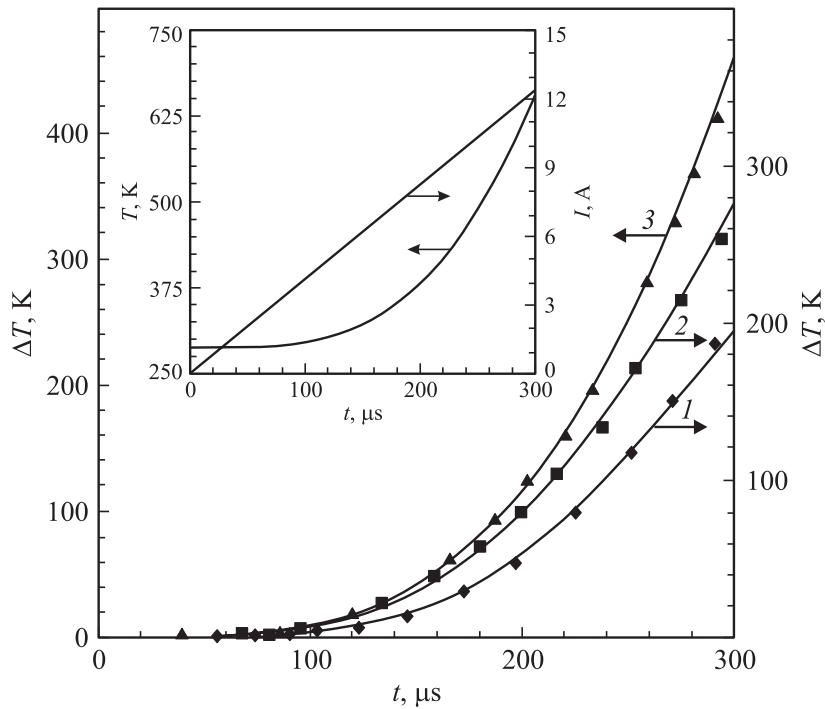
$$T(y, t) - T_0 = \frac{P}{2\pi\lambda lb} \left\{ \left( \frac{b}{2} - y \right) E_1 \left( \frac{(b/2 - y)^2}{4at} \right) + \left( \frac{b}{2} + y \right) E_1 \left( \frac{(b/2 + y)^2}{4at} \right) \right\} + \frac{P\sqrt{at}}{\sqrt{\pi}\lambda lb} \left\{ \Phi \left( \frac{b/2 - y}{\sqrt{4at}} \right)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

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;  $I$ ,  $\tau$  — ( $t < \tau$ ) — амплитуда и длительность прямоугольного импульса соответственно;  $R$ ,  $a$ ,  $\lambda$  — 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°С; рис. 2, 1) и алюминия (661°С; рис. 2, 2–4 и вставка).

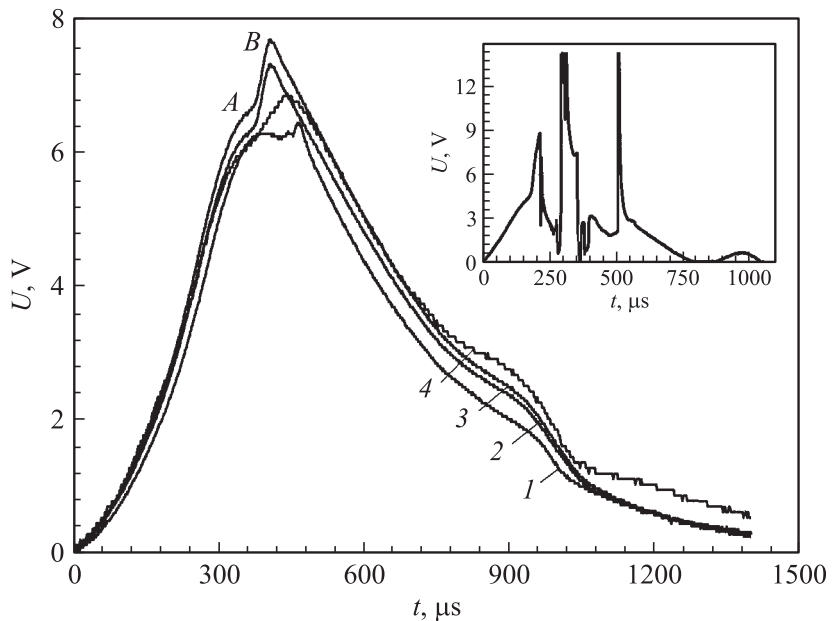
Как и в случае с прямоугольными токовыми импульсами [9], здесь также присутствует участок, связанный с образованием жидкой прослойки при достижении эвтектической температуры (рис. 2, 1). Нетрудно видеть, что образование эвтектики сопровождается уменьшением потенциала на осциллограммах  $U(t)$ , связанных 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/м<sup>2</sup> 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 —  $3.33 \cdot 10^{10}$   $\text{A}/\text{m}^2$  (сплошные кривые — расчет по уравнению (2), маркеры — экспериментальные данные). На вставке — закон изменения тока и динамика температуры поверхности кремния при пропускании импульса амплитудой  $j_{\text{max}} = 3.33 \cdot 10^{10}$   $\text{A}/\text{m}^2$ .

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 деграционные 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.