

06

## Особенности электростимулированного разрушения алюминиевой металлизации при наличии диэлектрических ступенек на поверхности кремния

© А.А. Скворцов, В.В. Рыбин, С.М. Зуев

Ульяновский государственный университет  
E-mail: scvor@list.ru

Поступило в Редакцию 21 октября 2009 г.

Рассмотрены особенности тепловой деградации напыленных на диэлектрические ступеньки алюминиевой металлизации при прохождении через нее одиночных прямоугольных импульсов тока амплитудой  $j < 8 \cdot 10^{10}$  А/м<sup>2</sup> и длительностью 100–1000 мкс. Предложена методика, позволяющая проводить диагностику слоев металлизации с диэлектрическими подслоями и определять область их безопасной работы.

Известно, что надежность и качество полупроводниковых устройств во многом определяются надежностью контактов металл–полупроводник и систем металлизации. Уменьшение минимального топологического размера элементов приводит не только к проблеме „токовых перегрузок“ в линиях, но и к проблеме металлизации диэлектрических ступенек на поверхности кремниевых пластин [1,2]. Изменение геометрии в местах ступенчатого рельефа приводит к локализации силовых линий электрического тока и, как следствие, локальному перегреву и ускоренной деградации слоя металлизации, находящегося на диэлектрической пленке. Поэтому целью настоящей работы является изучение деградационных процессов в структурах металл–полупроводник при наличии диэлектрических ступенек на его поверхности. Как и ранее [3,4], 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 мкм и удельным сопротивлением 10 Ω·см, на которых предварительно выращивались диэлектрические слои оксида или нитрида кремния. Выращивание

термического окисла производилось в диффузионных печах по стандартной технологии [2] в диапазоне температур 1150–1250°C в сухом кислороде. Осаждение пленок нитрида кремния осуществлялось за счет реакции дихлорсилана с аммиаком при пониженном ( $\sim 50$  Па) давлении в интервале температур 700–900°C на промышленных установках „Изотрон 2М“. Удельное сопротивление формируемых пленок было не ниже  $7 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ , а электрическая прочность не хуже  $5 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$ .

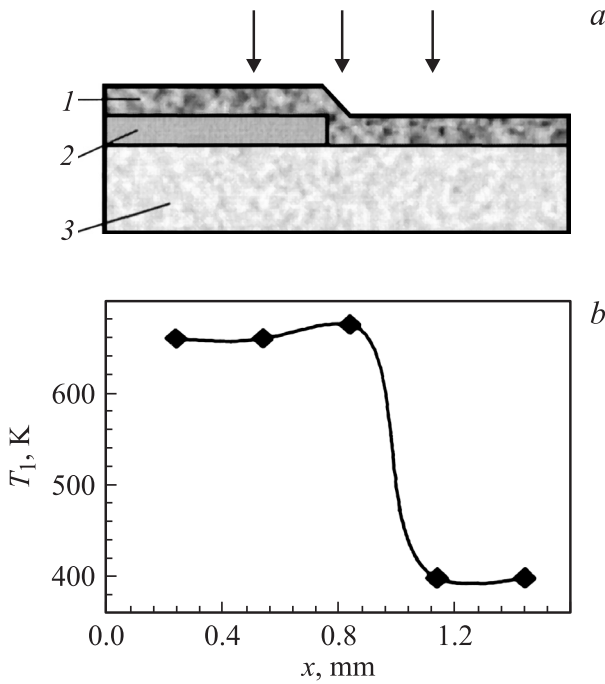
После этого методами оптической фотолитографии формировались диэлектрические ступеньки на поверхности Si, после чего на пластину методом электронно-лучевого напыления в вакууме наносилась алюминиевая пленка толщиной  $1 \mu\text{m}$ . Напыление осуществлялось на установке „Оратория-9“. Температура подложек ( $T = 373 \text{ K}$ ) и рабочее давление в процессе напыления ( $p = 7 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$ ) поддерживались постоянными и контролировались предварительно отградуированной платино-платинородиевой термопарой, находящейся вблизи напыляемых пластин, и вакуумметром. Скорость напыления алюминия не превышала  $2 \text{ nm/s}$ .

В заключение на поверхности кремния формировалась тестовая структура в виде дорожки (шириной  $75 \mu\text{m}$  и длиной  $3 \text{ mm}$ ) алюминиевой металлизации, лежащей на ступеньке таким образом, что половина ее находилась на диэлектрической пленке, а половина непосредственно на кремниевой пластине (рис. 1). Для регистрации падения напряжения с различных участков тестовой структуры формировались потенциальные контакты. Общий вид образцов и методика проведения опытов подробно изложены в [4].

Ранее было показано [5], что при наличии тонкого диэлектрического подслоя толщиной  $h_2$  динамика температуры  $T_1(t)$  при прохождении одиночного импульса тока  $I$  имеет вид

$$T_1(t) = T_0 + \frac{I^2 \bar{R}_1}{S} \left[ \frac{h_2}{\bar{\lambda}_2} + \frac{1}{\bar{c}_3 \bar{d}_3} \sqrt{\frac{t}{\bar{a}_3}} \right]. \quad (1)$$

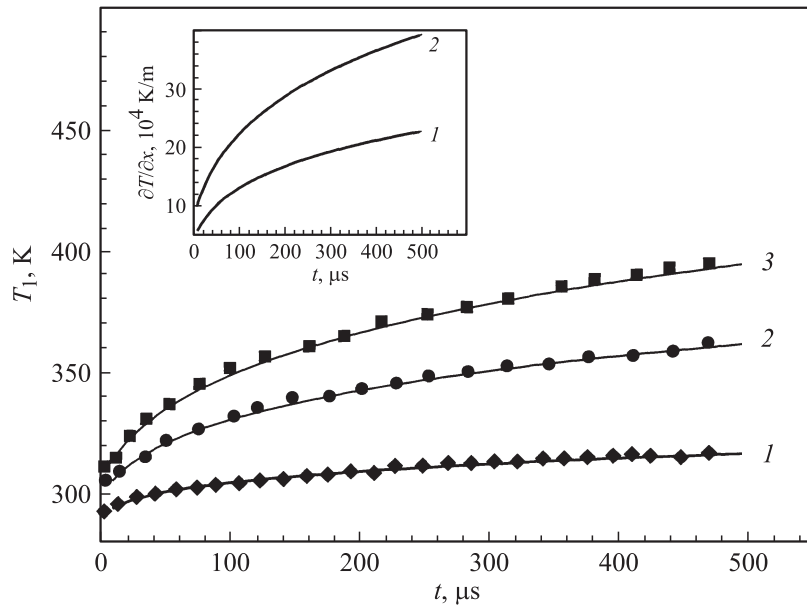
Здесь подстрочный индекс „1“ относится к Al-пленке; „2“ — к тонкой пленке диэлектрика толщиной  $h_2$ ; а „3“ — к полупроводниковой матрице;  $S$  — площадь теплопередачи,  $R$  — электрическое сопротивление,  $\lambda$  — теплопроводность,  $c$  — теплоемкость,  $a$  — температуропроводность. Черта над соответствующим символом означает среднеинтегральное (по температуре) его значение. Под среднеинтегральным значением величины  $b$  будем понимать  $\bar{b} = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_0}^{T_1} b(T) dT$ .



**Рис. 1.** Схема используемой структуры (а) и температурный профиль  $T_1(x)$  алюминиевой пленки в области „перегиба“ (b), полученный после прохождения одиночного прямоугольного токового импульса величиной  $j = 3.2 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  и длительностью  $450 \mu\text{m}$ . 1 — пленка алюминия ( $h_1 = 1.0 \mu\text{m}$ ); 2 — слой оксида кремния ( $h_2 = 0.1 \mu\text{m}$ ); 3 — кремниевая пластина ( $h_3 = 450 \mu\text{m}$ ).

Из уравнения (1) видно, то вблизи ступеньки, где Al-пленка лежит непосредственно на кремнии ( $h_2 = 0$ ) и на структуре металл–диэлектрическая пленка–полупроводниковая пластина ( $h_2 = 0.1 \dots 0.3 \mu\text{m}$ ) будет формироваться градиент температуры. Причем развиваемые градиенты в области ступеньки будут тем больше, чем толще пленка подслоя  $h_2$  и ниже теплопроводность пленки подслоя  $\lambda_2$ .

Анализ температурных режимов функционирования участков тестовой структуры осуществлялся по осциллограммам включения  $U(t)$ , снимаемым с соседних потенциальных зондов. При этом динамика



**Рис. 2.** Временные зависимости температуры Al-металлизации вблизи ступеньки, полученные из анализа осциллограмм включения при прохождении прямоугольного токового импульса амплитудой  $j = 2.8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ , длительностью  $\tau = 500 \mu\text{s}$  для систем: 1 — Al-Si; 2 — Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Si; 3 — Al-SiO<sub>2</sub>-Si. На вставке: изменение градиентов температуры в процессе прохождения импульсов тока вблизи „ступенек“ с диэлектрической пленкой: 1 — нитрида кремния (толщина  $h_2 = 0,1 \mu\text{m}$ ), 2 — оксида кремния (толщина  $h_2 = 0,1 \mu\text{m}$ ).

температуры  $T_1(t)$  анализируемого участка тестовой структуры оценивалось по изменению  $U(t)$ :

$$U(t) = IR_0(1 + \alpha(T_1(t) - T_0)). \quad (2)$$

Здесь  $R_0$  — сопротивление при начальной температуре;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления алюминия.

Осциллограммы напряжения снимались в области „ступеньки“, а также с участков тестовой структуры, лежащих целиком на кремнии или целиком на диэлектрической пленке.

Результаты исследования показали, что различный теплоотвод с рассматриваемых участков (рис. 1, *a*) приводит к созданию в области перегиба градиента температуры (рис. 1, *b*), достигающего наибольшего значения к моменту отключения импульса (рис. 2). Причем изменение толщины или теплопроводности промежуточной пленки заметно влияет на величину  $\partial T/\partial x$  вблизи „ступеньки“ при прохождении импульса тока.

Это наглядно подтверждается значениями  $T_1(t)$ , полученными осциллографическим методом, при регистрации  $U(t)$  с различных участков (длина их не превышала  $500 \mu\text{m}$ ) тестовой структуры, обозначенных на рис. 1 стрелками. Например, при пропускании импульса тока плотностью  $j = 2.8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$  и длительностью  $\tau = 500 \mu\text{s}$ , температура алюминия, лежащего на оксидной пленке к моменту окончания импульса, достигает значения  $T_1 = 400 \text{ K}$ , что на  $100 \text{ K}$  выше  $T_1$  в бинарной системе Al–Si (рис. 2).

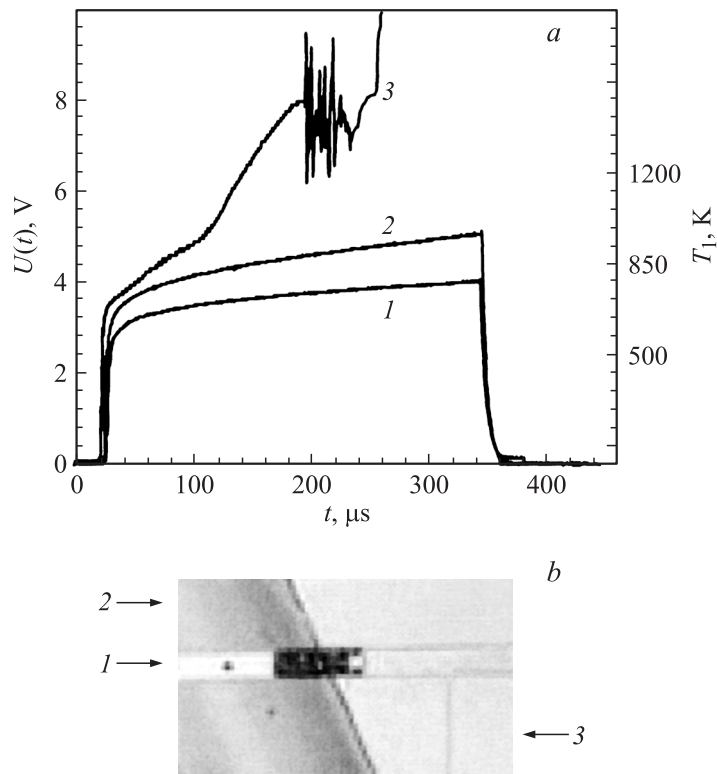
Наблюдаемый температурный градиент в области ступеньки (вставка, рис. 2) приводит к появлению преимущественных транспортных потоков  $J$  атомов Al по границам зерен [6,7]

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{E_a D C}{T_1^2 k} \frac{\partial T_1}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $E_a$  — энергия активации самодиффузии,  $C$  — концентрация,  $D$  — коэффициент самодиффузии,  $k$  — постоянная Больцмана.

В соответствии с (3) миграция атомов Al в температурном градиенте должна способствовать „вымыванию“ вещества из зернограничного слоя и образованию пор, что будет приводить к локальному увеличению  $j$ , вплоть до оплавления Al в этой зоне. Многочисленными экспериментами установлено, что процесс формирования расплавленной зоны начинается, как правило, в районе „ступеньки“ при плотностях тока  $j_{k0} \sim 0.9 j_k$ . Под  $j_k$  (так называемая „критическая“ плотность тока [5]) понимается такая плотность тока  $j$ , при которой начинают развиваться процессы оплавления алюминиевой металлизации, лежащей на диэлектрической пленке.

Особенности начала деградационных процессов в рассматриваемых структурах наглядно иллюстрируются на рис. 3. Осциллограмма включения в области „ступеньки“ носит осциллирующий характер (рис. 3, *a*, кривая 3), свидетельствующий о формировании расплавленной зоны [4]. При этом осциллограммы, снятые с алюминиевой металлизации, нанесенной непосредственно на кремний и на тонкую пленку  $\text{SiO}_2$  (рис. 3, *a*,



**Рис. 3.** *a* — вид осциллограмм включения при прохождении одиночного токового импульса амплитудой  $j = 4.4 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$  и длительностью  $350 \mu\text{s}$  на структурах: 1 — Al-Si; 2 — Al-SiO<sub>2</sub>-Si; 3 — в области „перегиба“. *b* — фотография последствий тепловой деградации структуры в области ступеньки после прохождения одиночного импульса тока плотностью  $j_{k0} = 4.4 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$  и длительностью  $350 \mu\text{s}$ : 1 — пленка алюминия ( $h_1 = 1.0 \mu\text{m}$ ); 2 — слой оксида кремния ( $h_2 = 0.1 \mu\text{m}$ ); 3 — кремниевая пластина ( $h_3 = 450 \mu\text{m}$ ).

кривые 1, 2), сохраняют свою монотонность и характеризуют процесс теплоотвода при прохождении токового импульса.

При дальнейшем увеличении  $j$  и достижении  $j_k$  (рис. 3, *a*, кривая 3) наряду с локальным оплавлением дорожки металлизации в области ступеньки (рис. 3, *b*) начинают развиваться процессы оплавления ме-

таллической пленки в системе Al–SiO<sub>2</sub>–Si, детально описанные в [3,4]. Деградационные процессы в системе Al–Si наступают при более высоких плотностях тока ( $j \sim 1.5j_k$ ) и связаны как с контактным плавлением в системе Al–Si, так и с конкурирующим с ним процессом оплавления алюминия [4].

Таким образом, деградационные процессы в дорожках металлизации, лежащих на диэлектрических ступеньках, связаны с формированием в этой области градиента температуры, активизирующего транспортные процессы в металлической пленке, что приводит к уменьшению значения „критической“ плотности тока. Это может служить причиной ускоренной тепловой деградации систем металлизации: зарождение расплавленных зон в области перегиба конкурирует с оплавлением пленки металла, лежащей на диэлектрическом подслое.

Работа выполнена при поддержке грантами РФФИ № 09-08-97011-р и № 08-08-97036-р, а также ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы“ (контракт № П2161 „Создание кристаллических структур на основе эвтектических расплавов металлов и полупроводников и исследование их свойств“).

## Список литературы

- [1] *Валиев К.А., Орликовский А.А., Васильев А.Г., Лукичев В.Ф.* // Микроэлектроника. 1990. В. 2. Т. 19. С. 116–131.
- [2] *Технология* СБИС. Т. 2 / Под. ред. Зи С. М.: Мир, 1986. 367 с.
- [3] *Скворцов А.А., Орлов А.М., Рыбин В.В.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 6. С. 18–24.
- [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., Пирогов А.В., Емельянова Т.Г.* // Неорганические материалы. 1993. Т. 29. № 11. С. 1559–1562.
- [6] *Kaur I., Gust W.* Fundamentals of grain and Interphase Boundary Diffusion. Stuttgart: Ziegel press, 1989. 438 s.
- [7] *Комник Ю.Ф.* Физика металлических тонких пленок. М.: Металлургия, 1986. 286 с.