

05:07

Фазовые превращения в системах металлизации при нестационарном тепловом воздействии

© А.А. Скворцов, С.Г. Каленков, М.В. Корячко

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)
E-mail: SkvortsovAA2009@yandex.ru

Поступило в Редакцию 13 марта 2014 г.

Рассмотрены фазовые переходы первого рода в алюминиевой металлизации при прохождении через нее одиночных прямоугольных импульсов тока амплитудой до $8 \cdot 10^{10}$ А/м² и длительностью 100–1000 мкс. Экспериментально изучены процессы формирования локальных оплавленных зон, а также их последующая миграция в процессе прохождения тока. Выявлены основные механизмы перемещения межфазной границы (за счет тепловыделения на границе раздела твердой и жидкой фаз) в условиях нестационарного нагрева металлической пленки. Экспериментально определены скорости распространения жидкой фазы вдоль дорожки металлизации (~ 25 м/с), а также предложена методика, позволяющая рассчитывать длину оплавленной зоны после прохождения импульса.

При рассмотрении надежности систем металлизации большинство авторов акцентирует внимание на длительных экспериментах при „докритических“ плотностях тока и деградационных процессах, не связанных с образованием расплавленных зон [1,2].

Однако повышенные электрические мощности и иные „жесткие“ условия эксплуатации полупроводниковых структур (особенно в силовой электронике) способствуют развитию деградации систем металлизации вплоть до их оплавления. Известны работы, посвященные разработке методик диагностики систем металлизации [3–5], в том числе при условии высоких тепловых „нагрузок“, приводящих к локальным фазовым переходам [6,7].

Целью предлагаемой работы является изучение фазовых превращений в системах металлизации в условиях тепловых ударов, вызываемых прямоугольными импульсами тока амплитудой j до $8 \cdot 10^{10}$ А/м² и длительностью $\tau_i = 100–1000$ мкс.

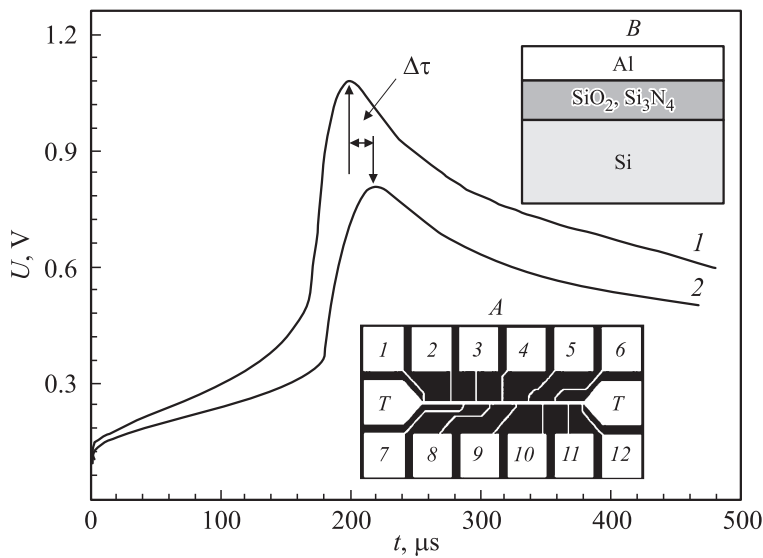


Рис. 1. Осциллограммы $U(t)$, снятые с 2 участков тестовой структуры системы Si–Al при прохождении одиночного токового импульса амплитудой $5.8 \cdot 10^{10}$ A/m² и длительностью $480 \mu\text{s}$. Сигналы снимались с различных участков (зонды 2,3, кривая 1 и зонды 8–4, кривая 2); $\Delta\tau = 22 \mu\text{s}$. Вставка А — фотография тестовой структуры. Т — „токовые“ контакты; 1–12 — контактные площадки для регистрации $U(t)$ с различных участков металлической дорожки. Вставка В — поперечное сечение многослойных структур Al–SiO₂–Si, Al–Si₃N₄–Si.

Экспериментальная установка, как и ранее [8], включала в себя источник прямоугольных токовых импульсов амплитудой до 60 А и длительностью до 1 мс, задающий генератор, цифровой запоминающий осциллограф и микроскоп (Метам Р1) с „цифровым“ окуляром для регистрации протяженности оплавленных зон.

В качестве объектов исследования выступали тестовые образцы, выполненные в виде металлической дорожки (длиной 3 мм, шириной $75 \mu\text{m}$, толщиной до $5 \mu\text{m}$) на полупроводниковой пластине (вставка А, рис. 1).

В роли основного токопроводящего слоя выступал алюминий (Al) как наиболее распространенный материал для металлизации полупро-

водниковых структур. В качестве подложек использовались легированные фосфором кремниевые пластины (Si), ориентированные в направлении (111), с удельным сопротивлением $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ и 60-микронным *n*-эпитаксиальным слоем ($15 \Omega \cdot \text{cm}$). Такие подложки предотвращают шунтирование слоев металлизации. На некоторых пластинах предварительно выращивались диэлектрические слои оксида (SiO_2) или нитрида кремния (Si_3N_4). Поперечное сечение рассматриваемых структур приведено на вставке В рис. 1. Осаждение пленок нитрида осуществлялось за счет реакции дихлорсилана с аммиаком при пониженном ($\sim 50 \text{ Pa}$) давлении в интервале температур $700\text{--}900^\circ\text{C}$. Выращивание термического оксида производилось в диффузионных печах по стандартной технологии в диапазоне температур $1150\text{--}1250^\circ\text{C}$ в сухом кислороде. Ряд образцов для стабилизации свойств контактов и улучшения адгезии подвергался изотермическому отжигу при температуре 550°C в инертной атмосфере.

Ранее [8] нами было выявлено, что деградационные процессы в системах металлизации на основе алюминия связаны с формированием оплавленной зоны (при достижении температуры плавления металлической пленки) и контактным плавлением на межфазной границе Al–Si, которое начинает проявляться при достижении температуры плавления эвтектики рассматриваемой системы.

Экспериментальное исследование тепловых режимов тонкой металлической пленки, лежащей на теплоотводящей подложке, проводилось на тестовых структурах по осциллограммам включения $U(t)$ [8,9]. Монотонный рост $U(t)$ при относительно малых временах t после включения импульса связан с нагревом тонкой пленки металла и определяется режимом отвода тепла в пластину полупроводника (рис. 1 и 2).

В данной работе на исследуемых структурах было зафиксировано начало фазообразования, проявляющееся на осциллограммах резким ростом потенциала (связан с плавлением Al, температура плавления которого 661°C , участки АВ, А'В', А''В'' на рис. 2) с последующим его „сбросом“, обусловленным контактным плавлением на границе алюминий–кремний (температура плавления эвтектики системы Al–Si 577°C) и расширением токопроводящего слоя (рис. 2, участки ВС, В'С', В''С'').

Увеличение плотности тока до значений $j \sim 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ заметно ускоряет полное оплавление тестовой структуры. При этом процессы оплавления (при $j > 5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностях импульсов

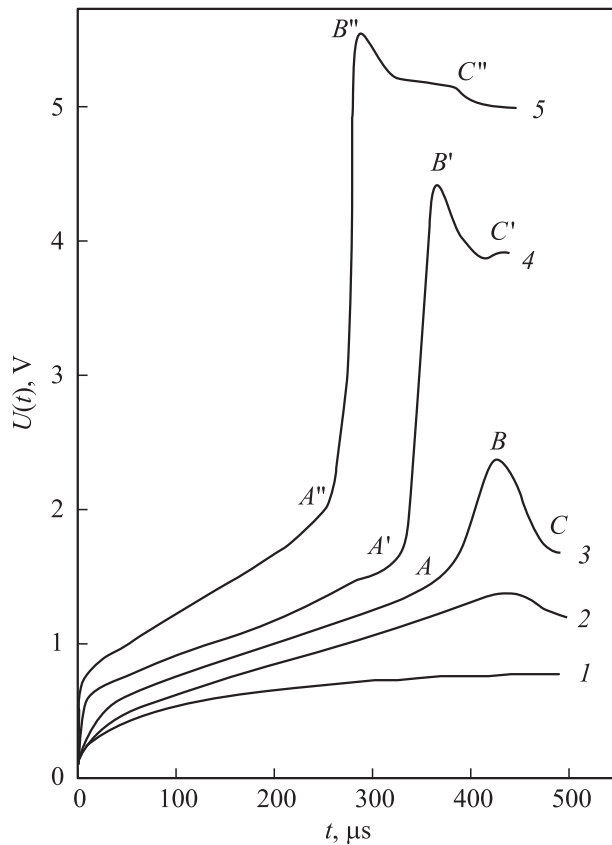


Рис. 2. Вид осциллограмм включения $U(t)$ (зонды 1–12) при прохождении одиночного токового импульса через алюминиевую дорожку металлизации, лежащую на кремнии. Длительность импульса $\tau_i = 500 \mu s$, амплитуда j (A/m^2): 1 — $4.5 \cdot 10^{10}$; 2 — $5.0 \cdot 10^{10}$ (контактное плавление, без оплавления Al); 3 — $5.2 \cdot 10^{10}$ (контактное плавление, с частичным оплавлением Al); 4 — $5.6 \cdot 10^{10}$ и 5 — $5.8 \cdot 10^{10}$ (полное оплавление Al).

$\tau_i \leq 300 \mu s$) преобладают над контактным плавлением в системах металлизации. Кроме того, наличие на некоторых пластинах достаточно толстых ($\sim 0.1 \mu m$) слоев SiO_2 или Si_3N_4 препятствует развитию процессов контактного плавления.

В предлагаемой работе основное внимание уделено механизмам формирования оплавленных зон и направленному их распространению.

Образование участков расплава связывается нами с процессами токопереноса и термодиффузии в дефектных местах металлической дорожки. Локальное уменьшение поперечного сечения в пленке приводит к росту плотности тока, температуры и, как следствие, появлению локального расплавленного участка.

Формирование такого участка при $j \sim 4 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, как правило, происходит на начальных этапах ($\sim 50 \mu\text{s}$) прохождения импульса. При увеличении плотности тока до $j \sim 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностях импульса тока $\tau_i > 100 \mu\text{s}$ такие участки могут распространяться вдоль дорожек металлизации. Направленность и среднюю скорость перемещения $V(t)$ оплавленной зоны в процессе прохождения импульса тока оценивали по динамике осциллограмм включения (рис. 1). Зная расстояние между участками, с которых снимались осциллограммы, и время $\Delta\tau$, можно оценить величину V . Для использованных в работе импульсов ее значение составляло 10–50 м/с.

Рассмотрим более детально процесс распространения расплавленной зоны, связанный с тепловыделением на ее границе.

Граница твердого (s) и жидкого (l) Al представляет собой область сосуществования фаз, имеющую конечную толщину l_x . Несбалансированное тепловыделение в этой области может быть рассчитано по формуле [10]

$$W_{sl} = I^2 R = I^2 (\rho_{ol} - \rho_{os}) \frac{l_x}{S}, \quad (1)$$

где $I = jS$ — амплитуда импульса тока, $\rho_{ol} = 2.4 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_{os} = 0.98 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ — удельное сопротивление жидкого и твердого алюминия, $b = 75 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$ — ширина и толщина дорожки соответственно, $S = bh$ — площадь поперечного сечения проводника. Если учесть, что W_{sl} (при температуре плавления алюминия) идет на плавление некоторого объема металла $S dx$, имеем

$$W_{sl} d\tau = HS dx, \quad (2)$$

где $H = 10.2 \cdot 10^8 \text{ J/m}^3$ — удельная теплота плавления алюминия [11], dx — длина оплавленной части дорожки, которая образовалась в процессе прохождения прямоугольного импульса тока мощностью W_{sl} за время оплавления $d\tau$. Тогда из (1) и (2) можно выразить длину

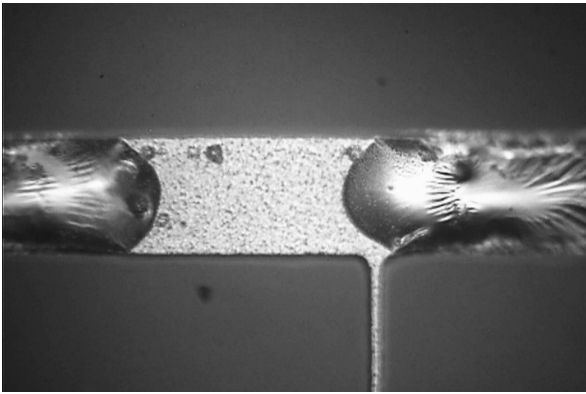


Рис. 3. Фотография фрагмента оплавления тестовой структуры после прохождения прямоугольного импульса тока $j = 6 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ длительностью $\tau_i = 300 \mu\text{s}$.

оплавленного участка

$$dx = \frac{j^2(\rho_{ol} - \rho_{os})l_x}{H} d\tau. \quad (3)$$

Положим l_x соизмеримой с толщиной слоя, в пределах которого распространяется тепло за время воздействия: $l_x = 2\sqrt{a_1\tau}$ (соотношение используется, как правило, при импульсных воздействиях различной природы: лазерное, электрическое и т. д. [12]), где $a_1 = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ — температуропроводность алюминия [11], τ — время оплавления фрагмента $[0, \dots, x]$ дорожки металлизации (отсчитываемое от момента A — или A' , A'' — на осциллограммах рис. 2). Тогда интегрирование уравнения (3) позволяет получить зависимость длины оплавленной части дорожки металлизации x_l от времени τ :

$$x_l(\tau) = 4/3 j^2(\rho_{ol} - \rho_{os})H^{-1}\sqrt{a_1}\tau^{3/2}. \quad (4)$$

Проверка данного уравнения производилась на структурах Al–SiO₂–Si и Al–Si. Для этого через них пропускались одиночные токовые импульсы амплитудой $j > 5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью $\tau_i > 200 \mu\text{s}$. При достижении „критических“ плотностей тока на поверхности алюминиевой пленки наблюдалось появление расплавленных зон. Формирование таких областей носило случайный характер, и зоны возникали в

различных местах тестовой структуры. Однако независимо от места зарождения межфазные границы при $\tau_i > 200 \mu\text{s}$ начинали перемещение. После выключения импульса расплавленные участки кристаллизовались. Фрагмент структуры после прохождения импульса тока приведен на рис. 3: слева и справа видны закристаллизованные участки, с четким фронтом кристаллизации, форма которого отражает неоднородность температуры по ширине алюминиевой дорожки. Измерение длины оплавленного участка осуществлялось при помощи металлографического микроскопа METAM P1 после прохождения токового импульса.

Экспериментальные результаты для систем Al–SiO₂–Si и Al–Si приведены на рис. 4. Нетрудно видеть, что с учетом используемых числовых значений параметров величина x_l согласуется с экспериментом как для бинарной системы Al–Si, так и для многослойной структуры Al–SiO₂–Si, что свидетельствует в пользу описанных механизмов. Однако обращает на себя внимание различие в динамике оплавления рассматриваемых структур (углы наклона прямых на рис. 4), что, по нашему мнению, определяется различными условиями теплоотвода в процессе прохождения токового импульса, а также возможностью шунтирования тока приповерхностными слоями полупроводника в системе Al–Si. Действительно, в области рассматриваемых температур ($\sim 660^\circ\text{C}$) в бинарной системе истинная плотность тока ниже расчетной, по сравнению с системой с диэлектрическим подслоем, в результате шунтирования тока приповерхностными слоями полупроводника. Поэтому при равной электрической мощности воздействующего на структуру импульса величина оплавленного участка алюминиевой пленки в системе SiO₂–Si выше, чем в бинарной системе. Особенно четко различие наблюдается при временах оплавления $\tau > 35 \text{ s}$.

Говоря о возможном влиянии процессов контактного плавления, следует подчеркнуть, что в условиях проводимого эксперимента на структурах Al–Si механизмы направленного оплавления преобладают над контактным плавлением на начальном этапе нагрева структур (см., например, рис. 2, кривые 3, 4, 5): участок OA осциллограмм — нагрев металлической пленки, AB — оплавление и только потом контактное плавление (участок BC).

Таким образом, в работе рассмотрены механизмы тепловой деградации систем алюминиевой металлизации, связанные с ее оплавлением. Речь идет о процессах формирования оплавленных зон и их последующей динамики при прохождении через проводящий слой одиночных

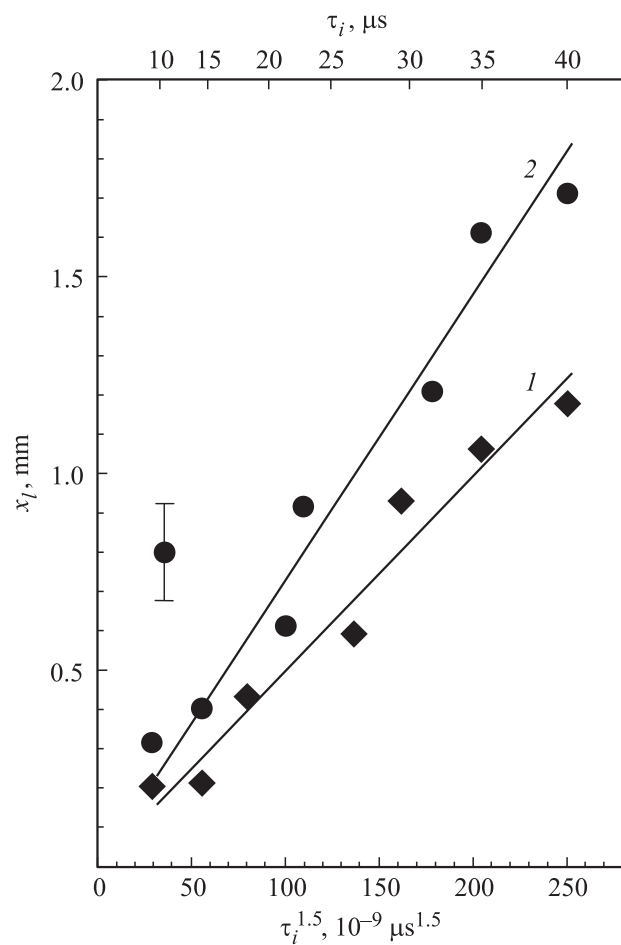


Рис. 4. Зависимость длины оплавленной зоны от времени оплавления τ для систем: 1 — Al-Si, 2 — Al-SiO₂-Si. Амплитуда импульса $j = 6 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, длительность τ_i варьировалась от 300 до 500 μs .

прямоугольных импульсов тока амплитудой $j < 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью τ_i до 1000 μs .

Выявлены основные механизмы перемещения межфазной границы, связанные с тепловыделением на границе раздела твердой и жидкой фаз

в условиях термоудара, создаваемого прямоугольным токовым импульсом. Экспериментально определены скорости распространения жидкой фазы вдоль дорожки металлизации (~ 25 m/s) в рассматриваемых условиях, а также предложена методика, позволяющая рассчитывать длину оплавленной зоны после импульсного токового воздействия и прогнозировать область безопасной работы систем металлизации на кремнии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-07-00620-а, 14-07-0086914-а, как НИР в рамках государственного задания по проекту № 2014/85 (код проекта 2290).

Список литературы

- [1] *Soestbergen van M., Mavinkurve A., Rongen R.T.H., Jansen K.M.B., Ernst L.J., Zhang G.Q.* // *Electrochimica Acta*. 2010. V. 55. P. 5459–5469.
- [2] *Hu C.-K., Ohm J., Gignac L. M., Breslin C.M., Mittal S.* // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 111. P. 093 722.
- [3] *Nguyen T.A., Joubert P.-Y., Lefebvre S., Chaplier G., Rousseau L.* // *Microelectronics Reliability*. 2001. V. 51. P. 1127–1135.
- [4] *Zhenqiang Ma, Gary S. Was* // *J. Mater. Res.* 1999. V. 14. N 10. P. 4051–4061.
- [5] *Zhang J.H., Chan Y.C., Alam M.O., Fu S.* // *Microelectronics Reliability*. 2003. V. 43. P. 1303–1310.
- [6] *Полищук А.А.* // *Современная электроника*. 2006. № 4. С. 20–24.
- [7] *Герасимчук О.А., Епифанцев К.А., Павлова Т.В., Скоробогатов П.К.* // *Микроэлектроника*. 2011. Т. 40. № 3. С. 230–240.
- [8] *Скворцов А.А., Рыбин В.В., Зуев С.М.* // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. № 6. С. 73–79.
- [9] *Скворцов А.А., Орлов А.М., Мурадов В.Е.* // *Письма в ЖТФ*. 2009. Т. 35. В. 13. С. 41–48.
- [10] *Белашенко Д.К., Орлов А.М., Орлова С.П.* // *Теплофизика высоких температур*. 1976. Т. 14. № 3. С. 580–585.
- [11] *Физические величины: Справочник* / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [12] *Карслоу Г., Егер Д.* *Теплопроводность твердых тел*. М.: Наука, 1964. 489 с.