

05;06

Исследование диффузии в многослойных тонкопленочных структурах на кремнии методом контактного плавления

© А.А. Скворцов, А.М. Орлов, В.Е. Мурадов

Ульяновский государственный университет

E-mail: scvortsovaa@ulsu.ru

Поступило в Редакцию 28 января 2009 г.

Рассмотрены особенности контактного плавления в тонкопленочных системах Al (толщина $h_1 = 5 \mu\text{m}$)—металлический (Ti, Ni, Mo) или полупроводниковый (Si, Ge) подслой ($h_2 = 0.1 \mu\text{m}$)—кремниевая пластина ($h_3 = 500 \mu\text{m}$) при прохождении через алюминиевую пленку одиночных прямоугольных импульсов тока амплитудой $j < 9 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью 100–1000 μs . Осциллографическим методом определены времена и скорости контактного плавления в рассматриваемых структурах.

На основе анализа механизмов контактного взаимодействия в системе Al—подслой (с учетом опытных данных по времени растворения подслоя в Al-пленке) предложена методика оценки коэффициентов многофазной диффузии компонентов в процессе прохождения токового импульса.

PACS: 81.15.Pq, 81.05.-t

Хорошо известно, что системы металлизации современных приборов и интегральных микросхем представляют собой многослойные структуры, содержащие подслои, толщина которых может быть на порядок меньше толщины основного токоведущего слоя [1–3]. Из-за различных теплофизических характеристик материалов подобные системы испытывают большие тепловые нагрузки, особенно в мощных полупроводниковых приборах, что может приводить к контактному плавлению в многослойных системах металлизации [4].

Вместе с тем особенности процессов контактного плавления применительно к тонкопленочным системам Al—Si с различными подслоями практически не рассмотрены. Отсутствуют методики, позволяющие оценить критические режимы работы, скорости (или времена) развития процессов образования расплавленных зон в таких системах при

импульсном токовом воздействии. Рассмотрению подобных вопросов и посвящена настоящая работа.

Для проведения экспериментов были сформированы структуры типа алюминиевая пленка (Al)—подслой—полупроводниковая пластина (Si). Основным токопроводящим слоем служила пленка алюминия (толщина h_1 не более $5 \mu\text{m}$). В роли подслоев выступали молибден, титан, никель, полупроводниковые кремний и германий, наносимые методом электронно-лучевого испарения. Методика напыления пленок, а также доказательство аморфного состояния подслоев германия (Ge_a) и кремния (Si_a) приведены в [5]. Толщина подслоя h_2 не превышала $0.1 \mu\text{m}$.

В качестве подложек использовались легированные фосфором кремниевые пластины толщиной $500 \mu\text{m}$, ориентированные в направлении (111), с удельным сопротивлением $\rho = 0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ и 60-микронным n -эпитаксиальным слоем ($15 \Omega \cdot \text{cm}$). Использование высокоомных эпитаксиальных слоев позволяло пренебречь ответвлением тока в подложку.

Регистрация температурных изменений в тонкопленочной структуре производилась по методике, детально описанной в [5–7]. Через тестовую структуру в виде дорожки металлизации [6] пропускались прямоугольные импульсы тока с осциллографической регистрацией падения напряжения $U(t)$ с участка тестовой структуры.

Как уже отмечалось [5–7], по осциллограммам $U(t)$ можно судить о динамике нагрева системы в процессе прохождения токового импульса. Более того, процессы необратимой деградации, связанные с появлением расплавленных областей в структуре четко отражаются на осциллограммах $U(t)$. Установлено [5–7], что всплеск потенциала на кривой $U(t)$ (участок oa на кривой 1, рис. 1) однозначно связывается с постепенно распространяющимся фронтом оплавления Al на анализируемом участке. Из-за быстротечности процесса оплавления Al можно считать, что поперечное сечение проводящей зоны за этот период меняется не существенно. Так что начальный момент перераспределения тока I между Al и образующимся расплавом можно отнести к моменту достижения экстремального значения U_{max} (a, a', a'' на кривых $U(t)$, рис. 1). Последующий сброс потенциала вызван процессом контактного плавления и расширением диффузионной зоны, которая представляет собой расплавленную Al-металлизацию и растворяющуюся в ней тонкую пленку подслоя (участки $ab, a'b', a''b''$, рис. 1).

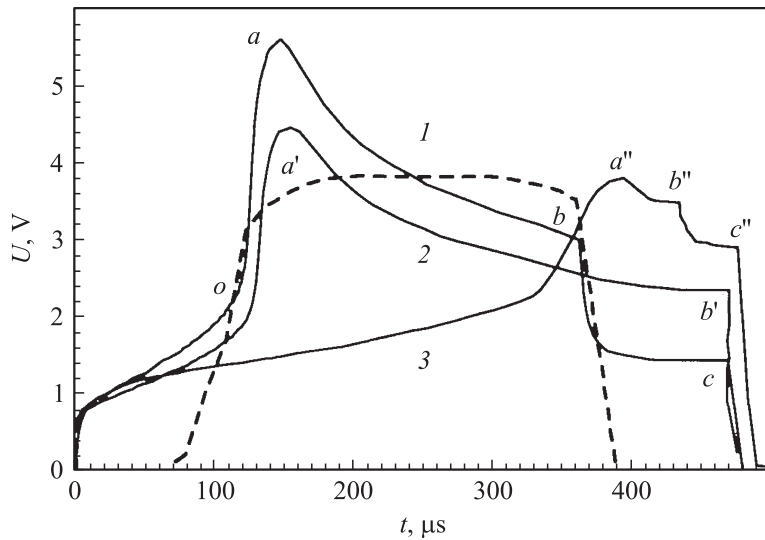


Рис. 1. Осциллограммы включения при прохождении одиночного импульса тока через системы: Al–Si_a–Si (кривая 1), Al–Si (кривая 2), Al–Ge_a–Si (кривая 3). Длина структуры $l = 2.3 \text{ mm}$; $h_1 = 5 \text{ μm}$. 1 — $j = 8.5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, $h_2 = 0.5 \text{ μm}$, $\tau = 480 \text{ μs}$; 2 — $j = 8.4 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, $h_2 = 0$, $\tau = 485 \text{ μs}$; 3 — $j = 8.2 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$, $h_2 = 0.5 \text{ μm}$, $\tau = 500 \text{ μs}$. Штриховая линия — падение напряжения, снятое с выхода фотоумножителя в процессе прохождения токового импульса длительностью $\tau = 480 \text{ μs}$ и амплитудой $j = 8.5 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ через систему Al–Si_a–Si. Зарегистрировано двухлучевым осциллографом одновременно с кривой 1.

Следует также отметить, что на осциллограммах включения, снятых со всех многослойных структур, присутствует повторный сброс потенциала (участки bc , $b''c''$, рис. 1). Он свидетельствует о завершающей стадии растворения пленки подслоя в расплаве, образующемся в результате контактного плавления. Убедительным подтверждением этому служат осциллограммы включения, снятые на структурах Al–Si с использованием высокоомных подложек Si без промежуточного слоя (рис. 1, кривая 2). Поэтому провести численную оценку коэффициента многофазной диффузии D_l на бинарных системах не представлялось возможным из-за неопределенности толщины растворенных в расплаве Al–Si слоев Si.

Применяемые нами структуры с различными подслоями позволили решить эту проблему, поскольку толщина растворенного подслоя легко может быть идентифицирована с толщиной осажденной пленки. А время растворения напыленных слоев легко оценивается по осциллограммам включения: в этот момент происходит ответвление тока в подложку (участки ab , $a''b''$, рис. 1).

Поэтому исследуемые структуры могут быть использованы для численной оценки D_l по скорости растворения пленки подслоя в расплаве. Рассмотрим проведем на системе $Al-Si_a-Si$, для чего найдем связь между толщиной кремниевой пленки h_2 и образовавшегося расплава h_l , состав которого определяется равновесной диаграммой фазового состояния. Опираясь на очевидное соотношение

$$\frac{d_2}{d_l} = \frac{m_2}{m_l} \frac{h_l S}{h_2 S}, \quad (1)$$

можем заключить, что из части пленки подслоя толщиной h_2 может сформироваться на той же площади S пленка расплава толщиной

$$h_l = \frac{m_l d_2}{m_2 d_l} h_2. \quad (2)$$

Здесь m и d — масса и объемная плотность соответственно. Подстрочный индекс „ l “ относится к расплаву, „1“ и „2“ — как и ранее, к алюминию и материалу подслоя, пошедшему в расплав при контактном плавлении.

Учитывая, что

$$m_l = \frac{m_2 C_1^l}{C_2^l}, \quad (3)$$

где $m_l = m_1 + m_2$, и C_1^l , C_2^l — концентрации алюминия и кремния в расплаве, представим массу расплава в виде

$$m_l = m_2 + m_2 \frac{C_1^l}{C_2^l} = m_2 \frac{100}{C_2^l}, \quad (4)$$

где $C_1^l + C_2^l = 100\%$.

Подставив (4) в (2) и учитывая толщину образующейся жидкой прослойки [8]:

$$h_1 = 2\sqrt{D_1\Delta t}, \quad (5)$$

можно получить выражение для толщины растворяемой пленки подслоя:

$$h_2 = \frac{C_2^l d_1}{100d_2} 2\sqrt{D_1\Delta t}. \quad (6)$$

Здесь Δt — время контактного плавления.

Из последнего выражения коэффициент многофазной диффузии

$$D_1 = \left[h_2 \frac{d_2}{d_1} \frac{100}{C_2^l} \right]^2 \frac{1}{4\Delta t}. \quad (7)$$

Для численных расчетов D_1 по уравнению (7) были использованы снятые при различных j осциллограммы включения $U(t)$. Продолжительность контактного плавления Δt оценивалась по временному интервалу между сбросами потенциалов соответствующих осциллограмм включения (участки ab , $a''b''$, рис. 1).

С увеличением плотности тока j увеличивались скорости оплавления Al и растворения пленки подслоя. Но вид осциллограмм не претерпевал качественных изменений. Это позволяло найти температурную зависимость D_1 . Температура оценивалась по максимальному падению напряжения в слое металлизации исследуемых тестовых структур:

$$T_1 = \frac{U}{j l M} - \frac{K}{M}. \quad (8)$$

Здесь l — длина дорожки металлизации. Коэффициенты K и M определялись температурной зависимостью удельного сопротивления жидкого Al ($T_1 > 934$ K):

$$\rho(T) = K + MT,$$

где $K = 1.35 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$, $M = 1.47 \cdot 10^{-10} \Omega \cdot \text{m/K}$ [9].

При расчете T_1 по уравнению (8) полагалось, что в процессе контактного плавления температура меняется незначительно. Дополнительная проверка этого осуществлялась по интенсивности светового потока с участка тестовой структуры в процессе прохождения токового

Параметры D_0 и E_a

Система	Al–Si _a	Al–Ge _a	Al–Ti	Al–Ni	Al–Mo
$D_0, \text{m}^2/\text{s}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^{-6}$	$7.9 \cdot 10^{-9}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$
$E_a, \text{kJ/mol}$	46	43	35	44	31

импульса. В качестве приемника света использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-64, совмещенный с окуляром микроскопа. Динамика электрических откликов с умножителя и тестовой структуры фиксировалась двухлучевым запоминающим осциллографом и представлена пунктирной линией на рис. 1. Нетрудно видеть, что во время первого сброса потенциала на осциллограмме (ab , I , рис. 1) сигнал с фотоумножителя практически не меняется (пунктир, рис. 1), что говорит о слабом изменении интенсивности свечения, следовательно, и температурной стабильности рассматриваемого процесса. Второй сброс потенциала (участок bc на кривой I , рис. 1) связан с ответвлением тока в подложку, снижением температуры и прекращением процесса контактного плавления.

Полученные температурные зависимости коэффициента многофазной диффузии D_l хорошо укладываются на прямые в полулогарифмических координатах $\ln(D_l) - 1/T$ (рис. 2) и описываются в интервале исследуемых T уравнениями (см. таблицу):

$$D_l = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right),$$

где E_a — энергия активации (kJ/mol), D_0 — предэкспоненциальный множитель (m^2/s). Погрешность при изменении D_l не превышала 60%, а температуры — 20%. Полученные результаты для систем с подслоями полупроводников хорошо согласуются с известными литературными данными [10,11]. Так, для системы Al–Si авторы работы [11] получили значение $D_l = 4.0 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ при $T = 940 \text{K}$ и $D_l = 8.7 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ при $T = 970 \text{K}$. Наши результаты, экстраполированные на эти температуры: $D_l = 3.6 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ при $T = 940 \text{K}$ и $D_l = 4.3 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ при $T = 970 \text{K}$. Рассчитанный по формуле (7) коэффициент $D_{\text{Ge-Al}}$ при $T = 900 \text{K}$ ($D_l = 5.4 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$) меньше на 50% приведенного в работе [10]: $D_{\text{Ge-Al}} = 9.2 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$.

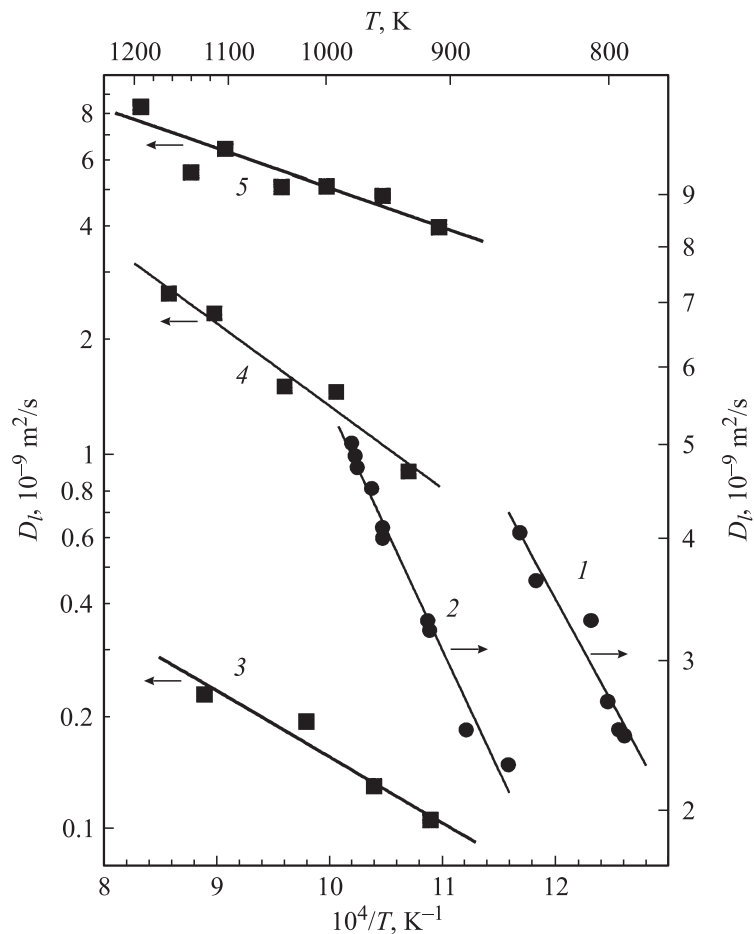


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента диффузии D_l для систем Al–Ge (1), Al–Si (2), Al–Ti (3), Al–Ni (4), Al–Mo (5).

Таким образом, исследование эволюции многослойных тонкопленочных систем в импульсном режиме позволяет не только вскрыть механизмы полного их разрушения при соответствующих токовых нагрузках, но и фиксировать массоперенос вещества в процессе импульсных токовых воздействий различной электрической мощности.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ 09-08-97011-р_поволжье_а, а также грантом президента РФ для молодых ученых—докторов наук МД-2675.2007.8.

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] *Сакович Е.Л., Лесникова В.П., Портнов Л.Я., Макаревич Т.В., Баранов В.В.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1994. № 3. С. 44–53.
- [3] *Waupner P.* // Byte. 1994. N 8. P. 67–74.
- [4] *Степанов Г.В., Шевченко О.Ф., Мукашлов Н.С.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 4. С. 79–81.
- [5] *Орлов А.М., Костишко Б.М., Скворцов А.А.* // Известия РАН. Неорганические материалы. 1996. Т. 32. № 5. С. 668–672.
- [6] *Скворцов А.А., Орлов А.М., Саланов А.А.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 19. С. 76–84.
- [7] *Скворцов А.А., Орлов А.М., Рыбин В.В.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 6. С. 18–23.
- [8] *Ершов Г.С., Майборода В.Г.* Диффузия в металлургических расплавах. Киев: Наук. думка, 1990. 234 с.
- [9] *Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.* М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [10] *Белащенко Д.К.* Исследование расплавов методом электропереноса. М.: Атомиздат, 1974. 88 с.
- [11] *Вилсон Д.Р.* Структура жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1972. 246 с.