

05.3;13.1

Термомиграция расплавленных зон по поверхности кремния в условиях теплового удара

© А.А. Скворцов, М.В. Корячко, М.Р. Рыбакова

Московский политехнический университет, Москва, Россия
E-mail: SkvortsovAA2009@yandex.ru

Поступило в Редакцию 21 января 2020 г.

В окончательной редакции 21 января 2020 г.

Принято к публикации 24 января 2020 г.

Рассматриваются вопросы формирования и миграции расплавленных зон в процессе электрического взрыва тонких пленок алюминия на окисленной поверхности кремния. Обнаружено различие в механизмах формирования и миграции расплавленных зон на поверхности в процессе прохождения токового импульса и после его отключения. Выявлено, что после отключения импульса тока миграция расплавленных зон определяется градиентом температуры вблизи локального теплового источника. По размерной зависимости скорости перемещения получены значения температурных градиентов и проведена оценка коэффициента термоупругости, определяющего динамику миграции зон в поле градиента температур.

Ключевые слова: электрический взрыв, тонкие пленки, градиент температур, полупроводниковая структура.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.08.49303.18210

Развитие микро- и нанoeлектроники сегодня невозможно без развития технологии тонких проводящих пленок [1,2], применяемых в качестве межсоединений и контактов [3,4]. Постоянное увеличение электротепловых нагрузок стимулирует проведение исследований воздействия электрических полей на состояние проводниковых систем [5] и представляется весьма актуальным направлением. Кроме того, электрический взрыв проводников активно используется сегодня в прикладных задачах: посредством электрического взрыва возможно реализовать синтез биметаллических наночастиц из несмешивающихся металлов (например, железа и свинца [6]), изготавливать порошки из проволок (Cu–Ni [7] и Cu [8]), моделировать тепловые перегрузки структур в автомобильной электронике [9] и т.д. Также процессы электрического взрыва проводниковых пленок сопровождаются формированием и миграцией капель расплава по поверхности. Эти вопросы связаны с решением задачи управления процессами растекания жидких фаз по поверхности твердых тел в различных внешних полях [10,11].

Поэтому цель настоящей работы — анализ процессов термомиграции расплавленных зон по поверхности окисленного кремния на завершающих этапах теплового разрушения тонкой пленки металла. Исследования проводились на установке [12,13], состоящей из источника прямоугольных импульсов тока (амплитуда до 60 А, длительность до 1 мс), цифрового запоминающего осциллографа и цифрового оптического микроскопа. В роли объектов исследования выступали структуры Al–SiO₂–Si. В качестве подложек использовались легированные фосфором кремниевые пластины, ориентированные в направлении (111), с удельным сопротивлением $\rho = 0.1 \Omega \cdot \text{см}$. На пластинах предварительно выра-

щивались диэлектрические слои оксида кремния (SiO₂) толщиной 50 нм. В роли токопроводящего слоя выступали пленки алюминия толщиной не более 5 мкм [12,13].

Известно, что при воздействии прямоугольных импульсов тока (плотностью $j = (2-8) \cdot 10^{10} \text{ А/м}^2$ и длительностью $\tau_i = 100-1000 \mu\text{с}$) основные деградационные процессы связаны с контактным плавлением в системе металл–полупроводник [12] и оплавлением пленки металла [13]. Осциллограмма включения $U(t)$ содержит три области, характеризующие нагрев пленки металла (область I на рис. 1), начало деградационных процессов (область II на рис. 1) и поверхностную миграцию расплавленных зон (область III на рис. 1). При плотностях тока $j > 6 \cdot 10^{10} \text{ А/м}^2$ и длительностях $\tau_i > 400 \mu\text{с}$ наступает полное оплавление структуры. В структурах с диэлектрическим слоем SiO₂ разрушение носит островковый характер (рис. 1). Это связывается нами с плохой адгезией жидкого металла к диэлектрической пленке, что не препятствует миграции капель жидкого металла по поверхности. Механизм формирования таких расплавленных областей уже обсуждался ранее [12,13] и связывался с процессами массопереноса Al в дефектных местах пленки (рис. 2). Следует подчеркнуть, что свертывание расплава в капли приводит к обрыву токопроводящей линии и прекращению тепловыделения. Однако достигаемые при этом температуры и температурные градиенты на поверхности стимулируют миграционные процессы и после обрыва металлической пленки [14]. Это отражается на осциллограмме включения в виде хаотических осцилляций напряжения (область III на рис. 1) и позволяет определить характерные времена миграции расплава после обрыва пленки (по длительности области III на рис. 1). Типичные результаты разрушения алюминиевой пленки

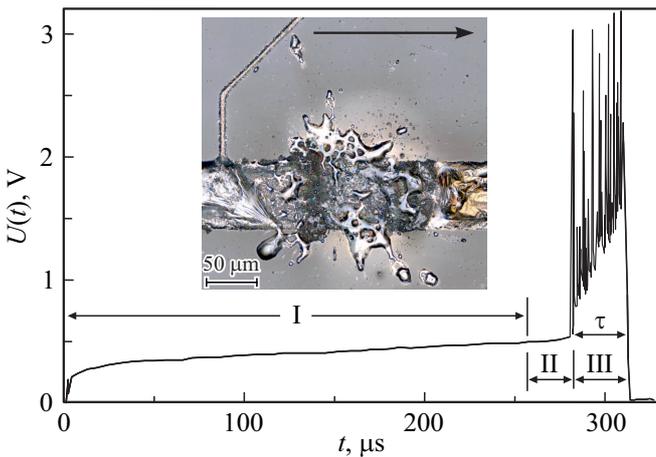


Рис. 1. Осциллограмма включения $U(t)$, измеренная для участка тестовой структуры при прохождении одиночного импульса тока прямоугольной формы длительностью $\tau_i = 350 \mu s$ и амплитудой $j = 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$. Область I — нагрев тестовой структуры, область II — начало деградационных процессов, область III — поверхностная миграция расплавленных зон. На вставке — фотография фрагмента системы металлизации с закристаллизованными включениями после процесса миграции в поле градиента температур в результате теплового удара, вызванного прохождением прямоугольного токового импульса. Стрелка указывает направление электрического тока в импульсе.

приведены на вставке к рис. 1. Нетрудно видеть, что перемещение расплавленного металла происходит во всех направлениях от источника тепла и не зависит от направления тока.

Рассмотрим далее особенности процесса растекания капли расплава по поверхности пленки SiO_2 при наличии градиента температуры. Как отмечалось в работе [15], в условиях ненулевого градиента температуры dT/dx движение жидкой капли по твердой поверхности определяется двумя механизмами: термокапиллярным и термоосмотическим. Первый эффект обусловлен температурной зависимостью поверхностной энергии жидкости, а второй — различием в величине удельной энтальпии жидкости в тонком пристеночном слое и в ее объеме. Проанализируем кинетику растекания капли от горячего края образца к холодному с учетом двух указанных эффектов. При реализуемых градиентах температуры кинетика миграции капли жидкости по твердой поверхности в одномерном случае (ось x направлена вдоль направления перемещения) описывается уравнением [15]:

$$x = \sqrt{\beta\tau}, \tag{1}$$

где

$$\beta = \frac{2z l \alpha \left| \frac{dT}{dx} \right|}{\chi \eta},$$

η — динамическая вязкость расплава, χ — коэффициент, зависящий от формы профиля растекающейся капли

(если толщина слоя жидкости одинакова по всей его длине, то $\chi = 0.5$), α — термоупругий коэффициент, dT/dx — градиент температуры, z — высота капли (вставка на рис. 2), l — размер мигрирующей зоны (под размером зоны будем понимать наибольший размер включения в направлении движения), τ — время миграции (область III на рис. 1).

Из уравнения (1) нетрудно получить размерную зависимость миграции зон по твердой поверхности при наличии градиента температур

$$x = \sqrt{\frac{2z\tau\alpha\left|\frac{dT}{dx}\right|}{\chi\eta}} \sqrt{l}. \tag{2}$$

Нетрудно видеть, что зависимость (2) $x = f(\sqrt{l})$ носит линейный характер. Результаты экспериментальной проверки размерной зависимости миграции зон от источника термоудара приведены на рис. 2. При обработке экспериментальных данных нами рассматривались только самостоятельные включения, полностью отделившиеся от общей массы расплава (вставка на рис. 1). По тангенсу угла наклона прямой на рис. 2 можно оценить величину α в том случае, если известны величины τ и dT/dx . Как уже отмечалось, величина τ определялась экспериментально при помощи осциллограмм включения, одна из которых приведена на рис. 1. Что касается величины dT/dx , то для расчета температурного поля, создаваемого прямоугольным фрагментом металлизации длиной l_1 и шириной b_1 , использовались полученные в работе [12] уравнения, описывающие динамику $T(y_1, t)$ на поверхности полупроводника после включения им-

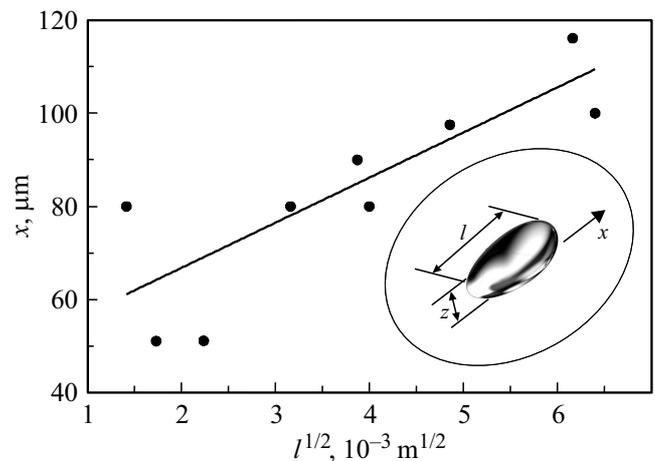


Рис. 2. Размерная зависимость перемещения x расплавленных зон после прохождения через систему одиночного импульса тока прямоугольной формы длительностью $\tau_i = 350 \mu s$ и амплитудой $j = 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$. На вставке — схематичное изображение расплавленной зоны размером l и высотой z , движущейся вдоль направления x .

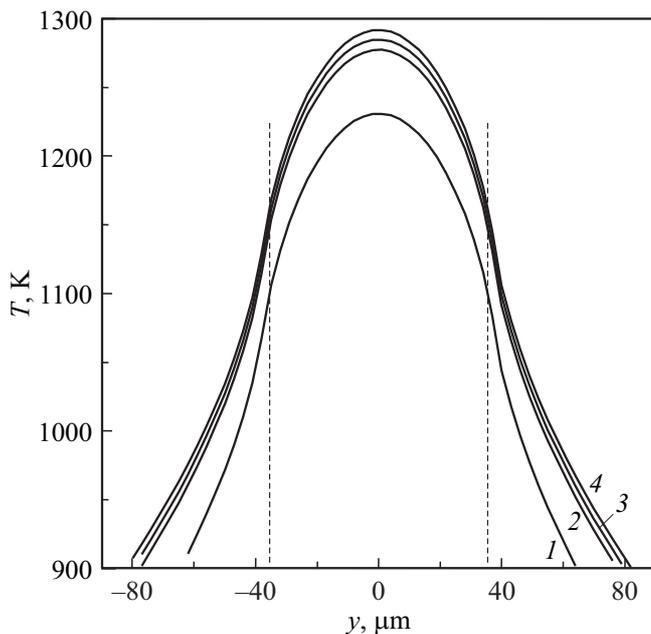


Рис. 3. Рассчитанное изменение температуры на поверхности кремниевой пластины (в направлении, поперечном дорожке металлизации) в процессе прохождения импульса тока длительностью $350 \mu\text{s}$ и амплитудой $8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ в различные моменты времени от момента включения: 1 — $t_1 = 300 \mu\text{s}$, 2 — $t_2 = 330 \mu\text{s}$, 3 — $t_3 = 350 \mu\text{s}$, 4 — $t_4 = 370 \mu\text{s}$. Штриховые линии ($y = \pm b_1/2$) — границы дорожки металлизации, $b_1 = 75 \mu\text{m}$.

пульса тока:

$$T(y_1, t) - T_0 = \frac{I^2 R_1}{2\pi\lambda_1 l_1 b_1} \left\{ \left(\frac{b_1}{2} - y_1 \right) E_1 \left(\frac{(b_1/2 - y_1)^2}{4a_1 t} \right) + \left(\frac{b_1}{2} + y_1 \right) E_1 \left(\frac{(b_1/2 + y_1)^2}{4a_1 t} \right) \right\} + \frac{I^2 R_1 \sqrt{a_1 t}}{\sqrt{\pi}\lambda_1 l_1 b_1} \times \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{b_1/2 - y_1}{\sqrt{4a_1 t}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{b_1/2 + y_1}{\sqrt{4a_1 t}} \right) \right\}. \quad (3)$$

Здесь и далее t — время с момента включения импульса тока,

$$E_1(z) = \int_z^\infty \frac{\exp(-\xi)}{\xi} d\xi$$

— интегральная экспонента, координаты x_1 (отсчитывается вдоль середины дорожки металлизации) и y_1 (направлена перпендикулярно дорожке металлизации и отсчитывается от ее центра) описывают точку измерения температуры на поверхности, I — амплитуда импульса тока, R_1 , a_1 , λ_1 — среднеинтегральные (по температуре) значения сопротивления дорожки металлизации, коэффициентов температуропроводности и теплопроводности кремния соответственно.

Результаты численных расчетов температурного профиля (3) в направлении, перпендикулярном дорожке, в

процессе прохождения импульса приведены на рис. 3. Вычисления проводились с учетом температурной зависимости параметров теплопереноса λ_1 и a_1 . Из приведенных на рис. 3 графиков и динамики нагрева структуры, оцениваемой по осциллограмме $U(t)$ (рис. 1), нетрудно видеть, что к моменту начала деградации (кривые 2–4) распределение температуры вдоль y_1 меняется незначительно, что позволяет оценить возникающие температурные градиенты в этой области. Из рис. 3 видно, что при рассматриваемых условиях вблизи дорожки металлизации развиваются высокие значения $\partial T/\partial y_1 \sim 3.3 \cdot 10^7 \text{ K/m}$. Таким образом, используя полученные значения температурного градиента, времени миграции зон $\tau = 40 \mu\text{s}$, а также $\eta = 0.05 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ для жидкого алюминия [16], $z = 6 \mu\text{m}$ и значения тангенса угла наклона прямой (рис. 2) $\operatorname{tg} \varphi = 9.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{1/2}$, можно получить значение показателя $\alpha = 1.4 \cdot 10^{-3} \text{ N/(m} \cdot \text{K)}$. Полученное значение величины α не противоречит данным для металлургических расплавов [16,17].

Таким образом, в работе изучена динамика движения макроскопических включений по поверхности кристалла в поле градиента температуры. Подтвержден механизм формирования расплавленных зон при тепловом ударе электрической природы. Обнаружено, что возникающие расплавленные зоны продолжают движение после обрыва электрической цепи в поле градиента температур. Проведена оценка величины градиента температур вблизи дорожки металлизации, а также характерных времен динамики расплавленных зон. Экспериментально зафиксирована размерная зависимость величины пробегов включений после прохождения прямоугольного импульса тока с длительностью τ_i , не превышающей $500 \mu\text{s}$, и амплитудой до $9 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$. По размерной зависимости перемещения с учетом определенных значений температурных градиентов проведена оценка коэффициента термоупругости, определяющего динамику миграции зон в поле градиента температур в условиях теплового удара.

Благодарности

Авторы признательны Б.Г. Покусаеву за интерес к работе и стимулирующие дискуссии.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00372).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Suhir E.* // Microelectron. Reliab. 2013. V. 53. N 7. P. 925–936.
- [2] *Dietrich P.* // Microelectron. Reliab. 2013. V. 53. N 9-11. P. 1681–1686.
- [3] *Ghosh S.* // Thin Solid Films. 2019. V. 669. P. 641–658.
- [4] *Jacob P., Nicoletti G.* // Microelectron. Reliab. 2013. V. 53. N 9-11. P. 1553–1557.
- [5] *Lv F., Liu P., Qi H., Liu J., Sun R., Wang W.* // Comput. Mater. Sci. 2019. V. 170. P. 109142.
- [6] *Pervikov A.V., Lerner M.I., Bakina O.V., Lozhkomoev A.S., Glazkova E.A.* // Inorgan. Mater.: Appl. Res. 2019. V. 10. N 3. P. 699–705.
- [7] *Kwona Y.S., An V.V., Ilyin A.P., Tikhonov D.V.* // Mater. Lett. 2007. V. 61. N 14-15. P. 3247–3250.
- [8] *Peng C., Wang J., Zhou N., Sun G.* // Current Appl. Phys. 2016. V. 16. N 3. P. 284–287.
- [9] *Nelhiebel M., Illing R., Detzel Th., Wöhlert S., Auer B., Lanzerstorfer S., Rogalli M., Robl W., Decker S., Fugger J., Ladurner M.* // Microelectron. Reliab. 2013. V. 53. N 9-11. P. 1745–1749.
- [10] *Гринац Э.С., Жбанов В.А., Кашиеваров А.В., Миллер А.Б., Потапов Ю.Ф., Стасенко А.Л.* // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 246–252.
- [11] *Lu H., Xu X., Xie L.-S., Wang H.-L., Sun G.-N., Yang Q.* // Chem. Eng. Sci. 2019. V. 195. P. 720–729.
- [12] *Скворцов А.А., Орлов А.М., Мурадов В.Е.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 13. С. 41–48.
- [13] *Skvortsov A.A., Zuev S.M., Koryachko M.V., Glinskiy V.V.* // Microelectron. Int. 2016. V. 33. N 2. P. 102–106.
- [14] *Skvortsov A.A., Zuev S.M., Koryachko M.V., Skvortsova A.A.* // Periódico Tchê Quím. 2019. V. 16. P. 448–456.
- [15] *Быховский А.И., Пролесковская А.Ю.* О кинетике растекания капли жидкости по твердой поверхности в условиях постоянного градиента температур // Поверхностные силы в тонких и дисперсных системах. М.: Наука, 1972. 328 с.
- [16] *Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова.* М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [17] *Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А.* Движение макроскопических включений в твердых телах. М.: Металлургия, 1971. 344 с.