

05.3;13.1

Анализ процесса разрушения алюминия на поверхности кремния при электрическом взрыве проводника

© М.В. Корячко, А.А. Скворцов, Д.Е. Пшонкин, О.В. Володина

Московский политехнический университет, Москва, Россия
E-mail: m.v.koryachko@gmail.com

Поступило в Редакцию 23 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 14 февраля 2022 г.

Принято к публикации 27 февраля 2022 г.

Рассматриваются процессы формирования капель расплава алюминия, их диспергирования и динамики по поверхности полупроводника при электрическом взрыве пленки металла. Выявлено, что в условиях протекания прямоугольных импульсов тока высокой плотности (амплитудой до $j_{\max} = 2 \cdot 10^{11}$ А/м² и длительностью до 2.0 мс) через тестовую структуру на основе алюминиевой пленки (толщина 5 мкм) происходит электрический взрыв проводника. При этом наблюдается диспергирование до 30% массы алюминиевой пленки. Установлено, что основным параметром, характеризующим дисперсность при разрушении алюминиевой пленки, является энергия электрического импульса. Экспериментально определено распределение закристаллизованных частиц алюминия по размеру (диаметру). Обнаружено, что наибольшее число частиц в рассматриваемых условиях разрушения имеет размер 1–3 мкм.

Ключевые слова: нестационарные состояния, тепловой удар, формирование капель на поверхности, нестационарный поверхностный массоперенос.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.09.52441.19114

Явление электрического взрыва проводников хорошо известно [1,2] и представляет значительный интерес для исследований физики конденсированного состояния, теплофизики, высоковольтной электротехники и смежных областей науки [3]. Физика этого явления продолжает детально изучаться, что позволяет управлять процессом, включая технологии подавления взрыва проводника с высокой плотностью тока за счет добавления поверхностных дефектов микронного масштаба [4]. Кроме того, развитие электровзрывных технологий позволяет решить ряд технологических проблем, связанных с получением локальных источников импульсного давления, нанесением тонких пленок, получением нанопорошков металлов и сплавов различного фазового и химического состава [3,4].

Процессы электрического взрыва проводниковых пленок, нанесенных на поверхность полупроводников и диэлектриков, имеют свою специфику, связанную с режимами теплоотвода пленочной системы. Электрический взрыв проводников в таких системах позволяет решать задачи управления процессами растекания жидких фаз по поверхности твердых тел в различных внешних полях [5,6], моделировать тепловые перегрузки структур в печатной [7] и силовой [8] электронике.

Что касается „силовых“ электроприборов и структур, то из литературы известно, что электрический взрыв типичных проводников (Al, Cu, Ag, Au), инициируемый пропусканием импульса тока высоких плотностей ($j \geq 10^6$ А/см²), приводит к оплавлению металла, нарушению электропроводности и формированию расплавленных зон, их миграции по поверхности, а также генерации ударных волн и электромагнитного

излучения [2–5]. Очевидно, что при таком воздействии проводник находится в экстремально неравновесных условиях, анализ которых очень важен при прогнозировании области безопасной работы металлических систем и вопросов нестационарного массопереноса расплава по поверхности [5,6].

Поэтому в настоящей работе рассмотрены вопросы нестационарного массопереноса (разрушения и диспергирования) алюминиевой металлической пленки на кремнии в условиях электрического взрыва.

Экспериментальные исследования проводились по методике [9,10] на установке, состоящей из генератора импульсов, работающего на основе конденсаторов большой емкости $C = 4000$ мкФ (максимальная амплитуда прямоугольного импульса тока и длительность импульса не превышали $I_{\max} = 150$ А и $\tau_{\max} = 2$ мс соответственно при сопротивлении образца не более $R_{\max} = 1$ Ω, крутизна переднего и заднего фронтов составляла 7 и 10 мкс соответственно), цифрового запоминающего осциллографа и оптического микроскопа для регистрации процессов „теплового“ разрушения систем металлизации [11].

Экспериментальные структуры представляли собой алюминиевую пленку, напыленную на пластины кремния. Основным токопроводящим слоем служила пленка алюминия (толщиной не более 5 мкм). В качестве подложек использовались легированные фосфором кремниевые пластины толщиной 400 мкм, ориентированные в направлении (111), с удельным сопротивлением 25 Ω·см. Методика подготовки структур детально изложена в [9,10].

Регистрация температурных изменений в тонкопленочной структуре проводилась по методике [9,10]. Че-

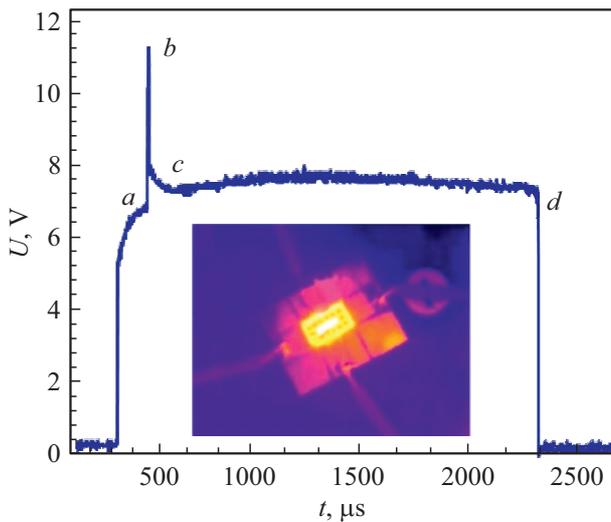


Рис. 1. Осциллограмма включения $U(t)$ при прохождении одиночного импульса тока прямоугольной формы амплитудой $j = 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью $\tau = 2 \text{ ns}$. На вставке — фотография полупроводниковой структуры, полученная с помощью тепловизора.

рез дорожку металлизации пропускались прямоугольные импульсы тока с осциллографической регистрацией падения напряжения $U(t)$ с участка тестовой структуры. По форме сигнала $U(t)$ судили о динамике нагрева системы в процессе прохождения токового импульса.

Согласно классификации [2], при плотностях импульсного тока более 10^{10} A/m^2 происходит разрушение объемного проводника. При этом большая часть металла разбрызгивается в виде капель. Наши экспериментальные исследования, проведенные на проволочных проводниках диаметром $150 \mu\text{m}$, подтверждают это: так, прохождение одиночного импульса тока плотностью $j = 5.5 \cdot 10^{11} \text{ A/m}^2$ и длительностью $400 \mu\text{s}$ приводило к тепловому разрушению объемного проводника. В случае пленочных модельных структур типа „алюминий на кремнии“ нами было экспериментально зафиксировано, что деградационные процессы в рассматриваемых системах начинаются при амплитуде прямоугольных токовых импульсов $j \sim 4 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительности τ не менее $200 \mu\text{s}$. При таких электротепловых нагрузках наблюдались нагрев проводника и направленное оплавление пленки металла, а при увеличении длительности импульса — процессы контактного плавления в системе металлическая пленка–полупроводниковая подложка. При этом проводник нагревался до температуры, близкой к температуре плавления алюминия ($T_L = 934 \text{ K}$). Оплавление алюминия в таких условиях осуществлялось путем перемещения границы раздела твердой и жидкой фаз вдоль дорожки металлизации.

Ранее было показано [10], что направленное оплавление происходит за счет несбалансированного тепловыделения в слое конечной толщины l_x на границе раздела твердого (s) и жидкого (l) Al. Длина оплавленного

слоя и скорость перемещения межфазной границы могут быть рассчитаны из соображений теплового баланса. Учтем, что при прохождении импульса тока за время $d\tau$ выделяемая мощность W_{sl} (при температуре плавления алюминия) идет на плавление некоторого объема металла Sdx

$$W_{sl}d\tau = HSdx. \quad (1)$$

Здесь $H = 10.2 \cdot 10^8 \text{ J/m}^3$ — удельная теплота плавления алюминия, dx — длина оплавленной части дорожки металлизации. Расписывая левую часть уравнения (1), получим

$$\left[I(\tau)^2 (\rho_{0l} - \rho_{0s}) \frac{l_x}{S} \right] d\tau = HSdx, \quad (2)$$

где $I(\tau)$ — амплитуда прямоугольного импульса, $\rho_{0l} = 2.4 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_{0s} = 0.98 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ — удельное сопротивление жидкого и твердого алюминия соответственно, $S = bh$ — площадь поперечного сечения проводника, $b = 75 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$ — ширина и толщина дорожки соответственно. Если полагать l_x соизмеримой с толщиной слоя, в пределах которого устанавливается температурный градиент $l_x = 2\sqrt{a_1\tau} = (1-4) \cdot 10^{-4} \text{ m}$, то из (2) можно получить

$$dx = \frac{I^2(\rho_{0l} - \rho_{0s})2\sqrt{a_1\tau}}{S^2H} dt, \quad (3)$$

где a_1 — температуропроводность алюминия. Интегрирование уравнения (3) позволяет получить зависимость глубины оплавления дорожки металлизации x_l в зависимости от времени оплавления τ_x

$$x_l(\tau_x) = \frac{4}{3} \frac{I^2(\rho_{0l} - \rho_{0s})\sqrt{a_1}}{S^2H} \tau_x^{3/2}. \quad (4)$$

Результаты исследования на изучаемых структурах (вставка на рис. 1) также показали удовлетворительное совпадение длины оплавленных зон в зависимости от мощности одиночного прямоугольного импульса тока. Максимальные скорости распространения зон в наших экспериментах достигали 35 m/s . Таким образом, при рассматриваемых условиях процесс тепловой деградации дорожки был связан с направленным перемещением межфазной (расплав–металл) границы и имел признаки электрического взрыва проводника [12].

При увеличении амплитуды импульса тока до $j = 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и выше нами наблюдался электрический взрыв пленочного проводника, сопровождающийся разрушением структуры и термомиграцией капель металла по поверхности кремния.

В результате исследований характерных времен разрушений было установлено, что при плотности тока $j = 8 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ процессы необратимой деградации сопровождаются быстрым ($\tau_{0a} \sim 75 \mu\text{s}$) нагревом пленки металла (участок $0a$ на рис. 1), оплавлением токоведущего слоя ($\tau_{ab} \sim 15 \mu\text{s}$), характеризующимся всплеском



Рис. 2. Микрофотография участка тестовой структуры после прохождения одиночного прямоугольного импульса тока амплитудой $j = 9 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью $\tau = 500 \mu\text{s}$.

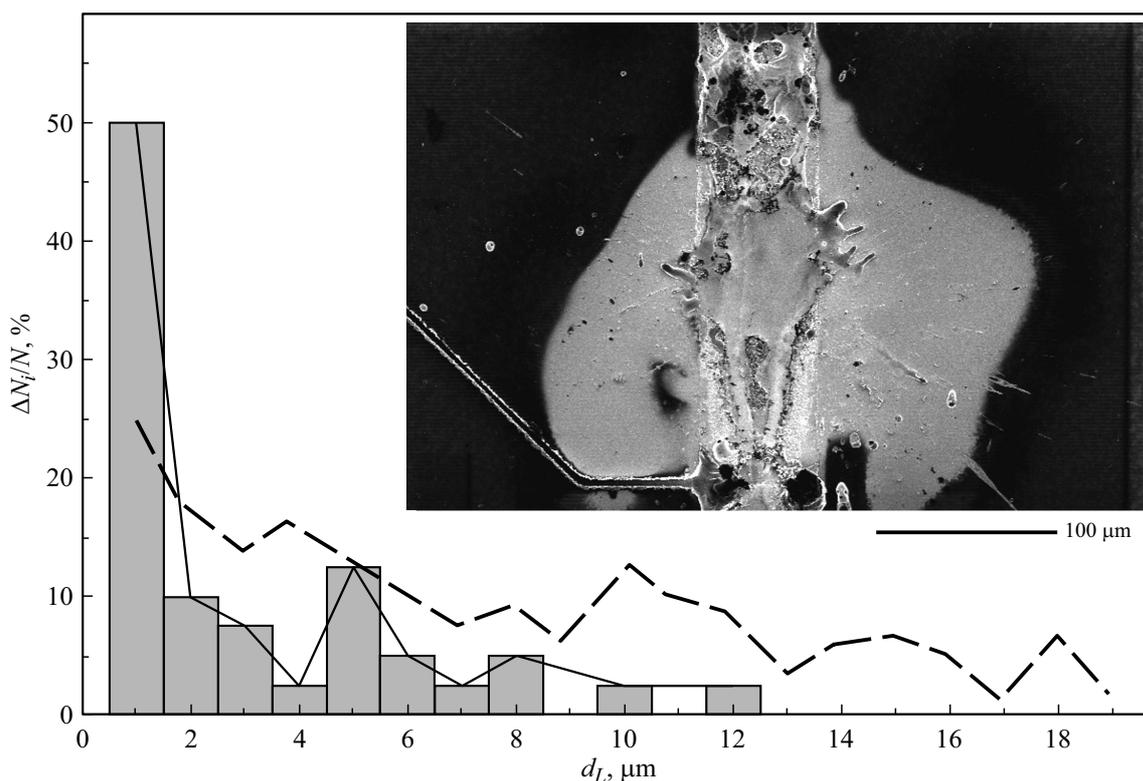


Рис. 3. Распределения по размеру частиц алюминия после прохождения импульса тока. Сплошная линия — $j = 9 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и $\tau = 500 \mu\text{s}$, штриховая — $j = 6 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и $\tau = 500 \mu\text{s}$. На вставке — полученная методом растровой электронной микроскопии фотография участка алюминиевой металлизации, вызванной прохождением одиночного прямоугольного импульса тока амплитудой $6 \cdot 10^{10} \text{ A/m}^2$ и длительностью $\tau = 500 \mu\text{s}$.

потенциала $U(t)$ (участок ab на рис. 1). При этом наблюдалось разбрызгивание металла по поверхности полупроводника (рис. 2). Рассматриваемый массоперенос каплей расплава приводит к формированию проводящих

металлических „островков“ и легированных поверхностных каналов, что обеспечивает устойчивое прохождение тока, несмотря на фрагментарный разрыв металлической дорожки. Поэтому наблюдаются „сброс“ потенциала на

кривой $U(t)$ (участок bc на рис. 1) и последующее квазистабильное значение $U(t)$ вплоть до выключения импульса (участок cd на рис. 1). Возможные возмущения $U(t)$, которые иногда наблюдались нами, могут быть связаны с локальным поверхностным окислением кремния и процессами контактного плавления в системе алюминий–кремниевая подложка.

Очевидно, что в процессе электрического взрыва пленочного проводника часть энергии импульса переходит в кинетическую энергию разлета продуктов диспергирования [13]. Кроме того, на динамику миграции расплавленных зон оказывают влияние сильные тепловые градиенты, образующиеся вблизи источника термоудара [14]. Результаты микроскопического анализа (вставка) и распределения образовавшихся расплавленных зон по размеру d_L приведены на рис. 3. Результаты исследований показали, что с ростом амплитуды импульса тока размеры формирующихся капель смещаются в субмикронную область и в продуктах диспергирования могут наблюдаться наночастицы [15].

Таким образом, в работе проведен анализ электротеплового разрушения системы алюминиевой металлизации на кремнии вплоть до электрического взрыва. Экспериментально обнаружено влияние электрической мощности токового импульса, проходящего через тестовую структуру, на характер ее разрушения: начиная от процессов направленного оплавления вплоть до разбрызгивания капель металла по поверхности (режим электрического взрыва). Выявлены параметры токовых импульсов для различных механизмов электротеплового разрушения пленки металла. Экспериментально зафиксировано распределение закристаллизованных частиц алюминия по размеру (диаметру). При сравнении распределений для различных мощностей импульса выявлено, что с ростом амплитуды импульса тока (при фиксированной длительности) размеры формирующихся капель смещаются в субмикронную область.

Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых (проект МК-1156.2021.4).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Электрический взрыв проводников*, под ред. А.А. Рухадзе, И.С. Шпигеля (Мир, М., 1965).
- [2] В.А. Бурцев, Н.В. Калинин, А.В. Лучинский, *Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках* (Энергоатомиздат, М., 1990).
- [3] R. Han, C. Li, W. Yuan, J. Ouyang, J. Wu, Y. Wang, W. Ding, Y. Zhang, *High Voltage*, **7** (1), 117 (2022). DOI: 10.1049/hve2.12184
- [4] T.J. Awe, E.P. Yu, M.W. Hatch, B.T. Hutsel, B.S. Bauer, *Phys. Plasmas*, **28** (7), 072104 (2021). DOI: 10.1063/5.0053898
- [5] H. Lu, X. Xu, L.-S. Xie, H.-L. Wang, G.-N. Sun, Q. Yang, *Chem. Eng. Sci.*, **195**, 720 (2019). DOI: 10.1016/J.CES.2018.10.017
- [6] Э.С. Гринац, В.А. Жбанов, А.В. Кашеваров, А.Б. Миллер, Ю.Ф. Потапов, А.Л. Стасенко, *ТВТ*, **57** (2), 246 (2019). DOI: 10.1134/S0040364419020054 [E.S. Grinats, V.A. Zhanov, A.V. Kashevarov, A.B. Miller, Yu.F. Potapov, A.L. Stasenko, *High Temp.*, **57** (2), 222 (2019). DOI: 10.1134/S0018151X19020056].
- [7] J. Brenneman, D.Z. Tansel, G.K. Fedder, R. Panat, *Extreme Mech. Lett.*, **43**, 101199 (2021). DOI: 10.1016/j.eml.2021.101199
- [8] M. Nelhiebel, R. Illing, Th. Detzel, S. Wöhlert, B. Auer, S. Lanzerstorfer, M. Rogalli, W. Robl, S. Decker, J. Fugger, M. Ladurner, *Microelectron. Reliab.*, **53** (9-11), 1745 (2013). DOI: 10.1016/j.microrel.2013.07.123
- [9] А.А. Скворцов, М.В. Корячко, М.Р. Рыбакова, *Письма в ЖТФ*, **46** (8), 21 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.08.49303.18210 [A.A. Skvortsov, M.V. Koryachko, M.R. Rybakova, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (4), 374 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020040276].
- [10] A.A. Skvortsov, S.M. Zuev, M.V. Koryachko, V.V. Glinskiy, *Microelectron. Int.*, **33** (2), 102 (2016). DOI: 10.1108/MI-05-2015-0049
- [11] A.A. Skvortsov, M.V. Koryachko, P.A. Skvortsov, M.N. Luk'yanov, *J. Mater. Eng. Perform.*, **29** (7), 4390 (2020). DOI: 10.1007/s11665-020-04925-4
- [12] Yu.A. Kotov, *J. Nanopart. Res.*, **5** (5-6), 539 (2003). DOI: 10.1023/B:NANO.0000006069.45073.0b
- [13] Y. Wang, R.E. Khayat, *J. Fluid Mech.*, **883**, A59 (2019). DOI: 10.1017/jfm.2019.924
- [14] V.V. Shepelev, N.A. Inogamov, S.V. Fortova, *Opt. Quantum Electron.*, **52** (2), 88 (2020). DOI: 10.1007/s11082-020-2214-0
- [15] A. Pervikov, N. Toropkov, S. Kazantsev, O. Bakina, E. Glazkova, M. Lerner, *Materials*, **14** (21), 6602 (2021). DOI: 10.3390/ma14216602