

Библиографический список

1. Справочник по расчету и конструированию контактных частей высоковольтных электрических аппаратов / Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 384 с.
2. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. – 464 с.
3. Дзекцер, Н.Н. Многоамперные контактные соединения / Н.Н. Дзекцер, Ю.С. Висленев. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
4. Свиташева, С.Н. Исследования процессов образования пленки естественного окисла на поверхности меди методом эллипсометрии / С.Н. Свиташева, Р.И. Любинская, К.К. Свиташев // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1986. – № 11. – С. 80-85.
5. Пьянков, В.А. Об образовании оксидной пленки на поверхности меди / В.А. Пьянков, А.П. Костюк // Украинский химический журнал. – 1960. – Т. XXVI. – Вып. 1. – С. 138-141.
6. Ronnquist, A. The oxidation of copper. A review of published data / A. Ronnquist, H. Fischmeister // J. Inst. Metals. – 1960-61. – V. 89. – P. 65-76.
7. Hart, R.K. The oxidation of aluminum in dry and humid oxygen atmospheres / R.K. Hart // Proc. Roy. Soc. A. – 1956. – V. A236. – P. 68-88.

УДК 621.791.3

О РАЗМЕРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТНОГО ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Б.С. Карамурзов, П.К. Коротков, В.А. Созаев
Кабардино-Балкарский государственный университет,
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, sozaevv@kbsu.ru

Приводится краткий обзор работ по размерной зависимости температуры контактного плавления наночастиц и нанопленок.

Знание закономерностей контактного плавления в тонкопленочных и порошковых системах имеет важное значение для оптимизации технологии контактно-реактивной пайки, получении новых композиционных материалов методом жидкофазного спекания, металлизации керамик, в технологиях производства изделий электроники [1-5]. В этой связи отметим работу [2], в которой на образцах Si осаждались слои Au толщиной 0,7–100 монослоев. Известно, что в системе Si-Au температура эвтектики $T_e = 370$ °С. Быстрый нагрев при 400–1000 °С приводил к образованию эвтектики с последующим образованием наностержней Au в Si диаметром 6–7 атомных слоев.

В работе [3] при создании проводящих микроструктур на кремнии. Для этого использовались наночернила, состоящие из золотых частиц размером 2–4 нм (30–35 вес.%) в толуоле, которые наносились на подложку (например, на Si) и одновременно облучались аргоновым

лазером мощностью 100 мВт и длиной волны 514 нм. Наночастицы золота вступали в контактное плавление с кремнием при температурах ниже эвтектической.

Эффективно использовались тонкопленочные технологии при контактно-реактивной пайке силовых полупроводниковых приборов [5]. На паяемые изделия напыляют пленки вступающие в контактное плавление и нагревают выше температуры эвтектики на 15–20°.

В связи с этим изучение размерного эффекта температуры контактного плавления (КП) актуально.

Теоретический анализ размерного эффекта температуры контактного плавления $T_{КП}$ можно провести в рамках термодинамики поверхностных явлений [6].

Используя результаты работы [6], в приближении регулярных растворов в [7] получена формула для размерной зависимости температуры контактного плавления $T_{КП}(r)$:

$$T_{КП}(r) = T_{КП}(\infty) \exp \left[-\frac{2\sigma(\infty)\Omega}{r\lambda} \left(1 - \frac{a}{2r} \right) \right], \quad (1)$$

где λ – теплота плавления эвтектики, Ω – атомный объем, $\sigma(\infty)$ – межфазная энергия растворов, граничащих по плоской границе раздела, a – const, $T_{КП}(\infty)$ – температура контактного плавления в массивных образцах, $a = 2\delta$ (δ – постоянная Толмена).

В работе [8], учитывая взаимосвязи между поверхностным натяжением и температурой КП, получены и другие уравнения для температуры КП, которые дают примерно тот же результат, что и формула (1), справедливость которой подтверждается экспериментально [9, 10].

В работах [6–8] при выводе формулы размерной зависимости $T_{КП}$ использовалась концепция капиллярных эффектов II рода, развитая Л.М. Щербаковым [11], которая позволяет в некоторой степени преодолеть проблему, связанную с трудностью выделения в нанобъекте «объемной» и «поверхностной» частей.

Зависимость (1) важно учитывать в технологиях получения новых наноматериалов методом жидкофазного спекания нанопорошков, а также в технологиях получения изделий электроники при создании систем металлизации к полупроводникам и диэлектрикам.

Многие изделия электроники, где используется контактно-реактивная пайка, в процессе работы разогреваются и кроме того находятся в электромагнитных полях, поэтому представляет интерес оценить влияние внешнего электромагнитного поля (с напряженностью электрического E и магнитного H полей) на температуру КП металлических микро- и наноструктур. Равенство химпотенциалов между твердой (S) и жидкой (L) фазой в этом случае записывается в виде:

$$\mu^{(s)} + \Omega \left(\frac{2\sigma}{r} + \frac{\partial\sigma}{\partial r} - \frac{E^2}{8\pi} - \frac{H^2}{8\pi} \right) = \mu^{(L)}, \quad (2)$$

где σ – межфазная энергия, которая считается размерно-зависимой по Р. Толмону. С учетом (2) для температуры КП наноструктур в электрическом поле $T_{КП}^E(r)$ получено [12]:

$$T_{КП}^E(r) = T_{КП}(r) \exp \left\{ \frac{\Omega}{\lambda} \left(\frac{E^2}{8\pi} + \frac{H^2}{8\pi} \right) \right\}, \quad (3)$$

где $T_{КП}(r)$ – температура КП в отсутствие электрического поля, зависящая от размера нанообъекта по (1).

Из соотношения (3) видно, что внешнее электрическое поле, независимо от направления, приводит к увеличению температуры КП наноструктур, но характер размерной зависимости температуры КП, при этом, не меняется (см. рис. 1).

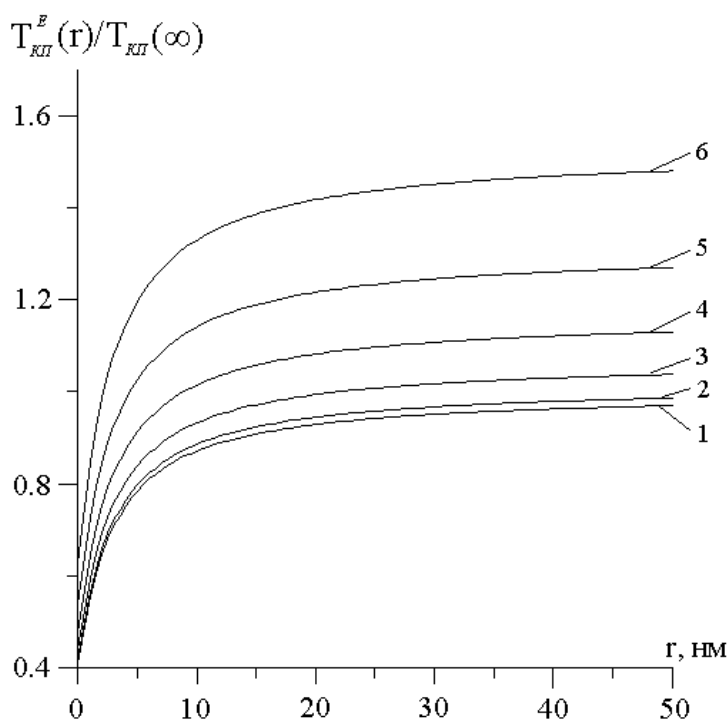


Рис. 1. Зависимость температуры КП от напряженности электрического поля E для пленок толщиной: $r = 10$ нм. Напряженность $E = 0$ В/см (кривая 1), $E = 5,2 \cdot 10^6$ В/см (кривая 2), $E = 1,04 \cdot 10^7$ В/см (кривая 3), $E = 1,56 \cdot 10^7$ В/см (кривая 4), $E = 2,08 \cdot 10^7$ В/см (кривая 5), $E = 2,6 \cdot 10^7$ В/см (кривая 6)

В работе [13] для многослойных систем, состоящих из чередующихся слоев компонентов A и B , показано, что температура $T_{КП}$ ниже температуры эвтектики массивных образцов на ΔT и зависит от толщины пленок:

$$\frac{\Delta T}{T_S} \approx \frac{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_{AB}(n-1) - 2\sigma_L}{\frac{n}{2}(d_1 + d_2)\lambda}, \quad (4)$$

где σ_A , σ_B , σ_{AB} – поверхностная энергия компонентов A и B и их границы соответственно, σ_L – поверхностная энергия жидкой фазы на основе компонентов A и B , n – общее число слоев в компонентах A и B толщиной d , λ – теплота плавления.

Эта формула нашла экспериментальное подтверждение в [14, 15]. В частности, используя формулу (4) можно примерно оценить теплоту плавления двухслойных пленок In/Sn (рис. 2) [9] в зависимости от толщины (рис. 2 указывает на размерную зависимость теплоты плавления λ).

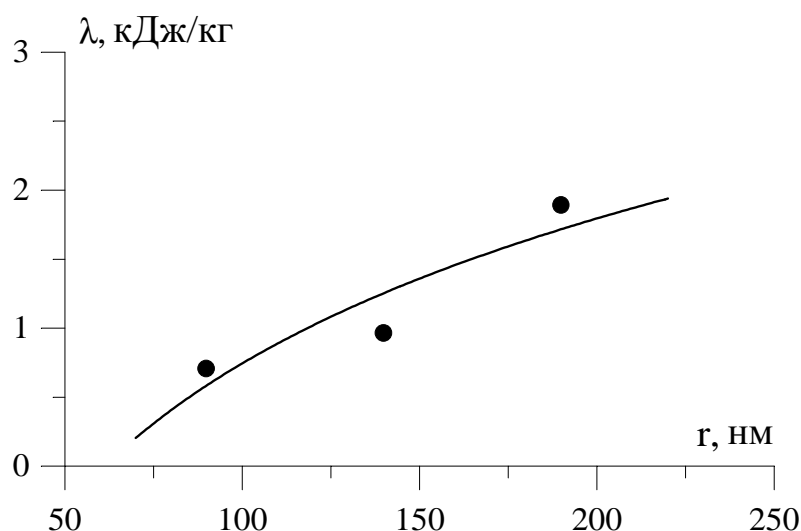


Рис. 2. Оценка теплоты плавления λ для пленок толщиной 90, 140 и 190 нм в системе In/Sn

При изучении $T_{КП}$ необходимо учитывать наличие гистерезиса плавления и кристаллизации нанообъектов [16-18]. Видимо этот эффект наблюдался в [19] при изучении фазовых переходов в двухслойных пленках.

В работе [20] показано, что многие размерные свойства (в том числе электрические, магнитные, эмиссионные) малых частиц можно связать с числом атомов (молекул) n с помощью соотношения:

$$\chi(n) = \chi(\infty) + An^{-\beta}, \quad (5)$$

где $\chi(\infty)$ – объемные значения свойств, A – численная константа, β – положительная величина, $0 < \beta < 1$. Возможно формулу (5) можно будет использовать и для оценки $T_{КП}$.

Библиографический список

1. *Ахкубеков, А. А.* Контактное плавление металлов и наноструктур на их основе / А. А. Ахкубеков, Т. А. Орквасов, В. А. Созаев. – М.: Физматлит, 2008. – 152 с.
2. *Toshiyuki, Adachi.* Eutectic reaction of gold thin-films deposited on silicon surface / Adachi Toshiyuki // *Surf. Sci.* – 2002. – V. 506. – P. 305–312.
3. *Chung, Jaewon.* Conductor microstructures by laser curing of printed gold nanoparticle ink / Jaewon Chung, Seunghwan Ko, Nicole R. Bieri, Costas P. Gridoropoulos, Dimos Poulikakos // *Appl Phys. Letters.* – 2004. – V. 84. – № 5. – P. 801–803.
4. *Громов, Д. Г.* Влияние толщины пленок меди в слоистых структурах Cu-W-Ta-N, Cu-C и C-Cu-C на температуру процесса плавления диспергирования // *Журн. физ. химии.* – 2005. – Т. 79. – № 9. – С. 1578–1585.
5. *Бокарев, Д. И.* Бессвинцовая контактно-реактивная пайка кристаллов к основаниям корпусов силовых полупроводниковых приборов / Д. И. Бокарев, В. В. Зенин, А. В. Рягузов // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* – 2006. – Т. 2. – № 4. – С. 153–155.
6. *Хоконов, Х. Б.* Влияние размера металлического зерна на температуру плавления / Х. Б. Хоконов, В. Б. Беличенко // *Сб. студенч. научных работ КБГУ.* – Нальчик-КБГУ. – 1970. – Вып. 5. – С. 201–203.
7. *Савинцев, П. А.* О применении контактного плавления в процессах пайки / П. А. Савинцев, А. А. Шебзухов, Н. Я. Диденко, М. Х. Афаунов // *Электронная техника.* – 1970. – Вып. 3. – С. 99–100.
8. *Коротков, П. К.* Размерный эффект контактного плавления металлов / П. К. Коротков, Т. А. Орквасов, В. А. Созаев // *Письма в ЖТФ.* – 2006. – Т. 32. – Вып. 2. – С. 28–32.
9. *Коротков, П. К.* Температура фазовых превращений в двухслойных тонких металлических пленках / П. К. Коротков, Т. А. Орквасов, Р. А. Мусуков, В. А. Созаев // *Известия РАН. Сер. Физическая.* – 2008. – Т. 72. – № 10. – С. 1493–1495.
10. *Коротков, П. К.* Размерный эффект температуры фазовых превращений в контакте тонких металлических пленок / П. К. Коротков, Т. А. Орквасов, Р. А. Мусуков, В. А. Созаев // *Журнал технической физики.* – 2008. – Т. 78. – Вып. 3. – С. 99–100.
11. *Щербаков, Л. М.* Общая теория капиллярных эффектов второго рода / Л. М. Щербаков. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 28–37.
12. *Канчукоев, В. З.* Влияние электромагнитного поля на температуру контактного плавления микро- и наноструктур / В. З. Канчукоев, П. К. Коротков, Т. А. Орквасов, В. А. Созаев // *Вестник КБГУ. Сер. физические науки,* 2005. – Вып. 10. – С. 18–19.
13. *Гладких, Н. Т.* Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках / Н. Т. Гладких, С. В. Дукаров, А. П. Крышталь, В. И. Ларин, В. Н. Сухов, С. И. Богатыренко. – Харьков: ХНУ им. В. Н. Карамзина, 2004. – 276 с.
14. *Gladkikh, N. T.* A method of studying phase diagrams of binary systems / N. T. Gladkikh, A. V. Kunchenko, V. I. Larin et al. // *Functional Materials.* – 1999. – V. 6. – N 5. – P. 958–963.
15. *Сухов, В. Н.* Внутренний размерный эффект плавления в слоистых пленочных системах эвтектического типа / В. Н. Сухов, И. Г. Чурилов // *Адгезия расплавов и пайка материалов.* – 2008. – №41. – С. 9–14.
16. *Скрипов, В. П.* Спонтанная кристаллизация переохлажденных жидкостей / В. П. Скрипов, В. П. Коверда. – М.: Наука, 1984. – С. 98–104.
17. *Самсонов, В. М.* Молекулярно-динамическое исследование плавления и

- кристаллизации наночастиц / В. М. Самсонов, С. С. Харечкин, С. Л. Гафнер, Л. В. Редель, Ю. Я. Гафнер // Кристаллография. – 2009. – Т. 54. – № 3. – С. 530–536.
18. Гафнер, С. Л. Структурные переходы в малых кластерах никеля / С. Л. Гафнер, Л. В. Редель, Ж. В. Головенько, Ю. Я. Гафнер, В. М. Самсонов, С. С. Харечкин // Письма в ЖЭТФ. – 2009. – Т. 89. – № 7. – С. 425–431.
19. Мягков, В. З. Множественный самораспространяющийся высокотемпературный синтез и твердофазные реакции в двухслойных тонких пленках / В. Г. Мягков, Л. Е. Быкова, Г. Н. Бондаренко // ЖЭТФ. – 1999. – Т. 115. – Вып.5. – С. 1756–1764.
20. Лахно, В. Д. Кластеры в физике, химии, биологии / В. Д. Лахно. – Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 256 с.

УДК 539.21:539.19:536.42

О ЗНАКЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

С.В. Карпенко

Учреждение Российской академии наук Научно – исследовательский институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89А, sv_karpenko@mail.ru

Предсказана возможность потери стабильности кристаллической решетки при переходе поверхностной энергии в область отрицательных значений при высоком давлении, а также экспериментально определены условия возникновения подобного метастабильного состояния.

В последние годы возрос интерес к свойствам вещества при высоких давлениях. В данной работе рассматриваются причины потери стабильности кристаллической решетки ионных диэлектриков под действием высоких давлений. В равновесных условиях, если следовать формализму Гиббса [1], поверхностная энергия представляет собой строго положительную величину [2]. Однако, с ростом внешнего давления поверхностная энергия уменьшается [3], и при некотором давлении p_{kr} поверхностная энергия может обратиться в нуль, а при дальнейшем увеличении давления – перейти в область отрицательных значений. Такое состояние вещества явно неустойчиво и может привести к разрушению образца. Формализм метода функционала электронной плотности [3] позволяет рассчитать значения давлений, при которых поверхностная энергия может обратиться в нуль. Расчет проводился нами для ионных кристаллов со структурой решетки типа хлорида натрия.

Термодинамический потенциал кристалла под давлением можно записать в виде [4]:

$$G = \sum_{k=1}^7 N_k U_k(a_k R) - V \frac{\partial}{\partial V} \left[\sum_{k=1}^7 N_k U_k(a_k R) \right] - \frac{\alpha_\mu}{R} + 4\pi r^2 k \sigma, \quad (1)$$