

УДК 541.532.264

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В ТВЕРДОЙ ФАЗЕ

В.К. Кумыков

Кабардино-Балкарский государственный университет  
360004, Нальчик, ул. Чернышевского, 173  
koumykov@hotmail.com

**Аннотация:** Статья посвящена анализу систематических ошибок, возникающих при высокотемпературных измерениях поверхностного натяжения металлов в твердой фазе компенсационным методом нулевой ползучести. Источником ошибок при измерении поверхностного натяжения с использованием электротокowego нагрева образца является возникающий в нем пинч-эффект, который существенно влияет на измеряемую величину и должен учитываться в виде специальной поправки.

**Ключевые слова:** *поверхностное натяжение, нулевая ползучесть, магнитное давление, пинч-эффект.*

Изучение поверхностных явлений в материалах, используемых при создании элементной базы полупроводниковых приборов, явилось одной из предпосылок создания новых технологических решений в микроэлектронике. Особый интерес в технологиях микроэлектроники представляют тугоплавкие металлы, знание поверхностных характеристик которых позволяет вести целенаправленный поиск высокотемпературных металлических покрытий к полупроводникам и диэлектрикам, оценивать их адгезионные характеристики. Важной поверхностной характеристикой металлов является их поверхностное натяжение, измерению которого посвящен ряд работ [1].

В настоящее время наиболее совершенным методом для исследования поверхностного натяжения твердых металлов  $\sigma$  является компенсационный метод нулевой ползучести [2]. Отсутствие недостатков традиционного метода Удина и малая относительная погрешность измерений позволяют получить надежные данные  $\sigma$  металлов. Суть метода состоит в следующем.

Образец цилиндрической формы подвешивается в градиентной трубчатой печи, создающей максимальную температуру в его средней части. При температуре, близкой к температуре плавления, этот участок образца приходит в состояние ползучести. При этом под действием сил поверхностного натяжения при определенных условиях будет наблюдаться стягивание образца. По величине стягивающего усилия, действующего на образец, можно рассчитать его поверхностное натяжение:

$$\sigma = \frac{1}{\pi r} (P + f), \quad (1)$$

где  $r$  – радиус образца,  $P$  – вес нижней части образца до линии

ползучести,  $f$  – величина добавочной компенсирующей силы.

Указанным методом ранее было измерено поверхностное натяжение ряда легкоплавких металлов.

Проведение измерений при высоких температурах связано с рядом трудностей, одна из которых обусловлена необходимостью сохранения чистоты рабочей камеры: пары нагревательных элементов, адсорбируясь на поверхность образца, существенно влияют на результаты измерений. Кроме того, использование нагревательных элементов из тугоплавких металлов, повышая предел рабочих температур, все-таки не позволяет достичь температур, достаточных для измерения поверхностного натяжения самих тугоплавких металлов.

В связи с этим был разработан высокотемпературный вариант компенсационного метода, позволяющий устранить указанные недостатки и проводить измерения  $\sigma$  металлов в широком диапазоне температур [3-7].

Особенность высокотемпературного прибора - нагрев проволочного образца, выполненного в виде перевернутой буквы П, с помощью переменного электрического тока. Градиент температуры в образце обеспечивается теплоотводом, сверху массивными зажимами и снизу легким радиатором из исследуемого металла в виде изогнутой пластинки, навешиваемой на горизонтально расположенную часть образца. В дальнейшем в экспериментальную установку вносился ряд усовершенствований [8-13].

К числу систематических ошибок в данном эксперименте следует отнести влияние магнитного давления на образец, обусловленного прохождением через него электрического тока [14,15]. Основным фактором силового действия тока на проводник является взаимодействие тока с порождаемым им магнитным полем (пинч-эффект). Образование упругих напряжений в цилиндрическом образце при прохождении через него электрического тока происходит следующим образом.

Магнитное поле, возникающее в пространстве проводника с током, действует с силой Лоренца на вызвавший это поле дрейфующий электронный газ. Направленная радиально к центру проводника, она вызывает в том же направлении сжатие электронного газа, сопровождающееся образованием отрицательного объемного электрического заряда. У поверхности же проводника, где концентрация электронов снижается, формируется положительный заряд (при этом, естественно, полный заряд проводника остается равным нулю). Вследствие такой поляризации в проводнике образуется поперечное к току электрическое поле (поле Холла), которое, действуя на ионную решетку, приводит к ее упругому сжатию с образованием механических напряжений.

Таким образом, ток, текущий по проводнику, окружает себя кольцевыми силовыми линиями магнитного поля. Взаимодействие тока с его собственным магнитным полем создает силу, сжимающую проводник. Сила сжатия появляется благодаря взаимодействию азимутального магнитного поля  $H$  с продольным током  $I$ . При этом условии к поверхности проводника приложено магнитное давление, равное  $P_m = H^2 / 8\pi$ , где  $H$  – напряженность магнитного поля (см. рис. 1).

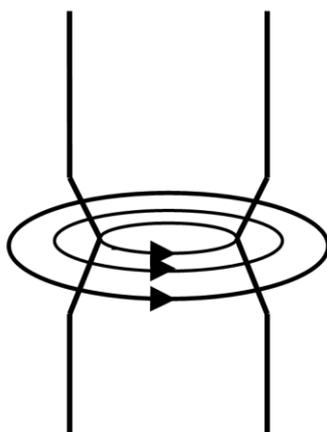


Рис. 1. Радиальное сжатие образца

Поправку на «пинч-эффект» при измерении поверхностного натяжения можно ввести следующим образом. При прохождении переменного электрического  $\vec{H}$  тока через образец последний нагревается, приходя при соответствующей температуре в состояние ползучести.

При этом изотермическая работа сил тяжести и магнитных сил равна работе образования новой поверхности:

$$Pdl + P_m 2\pi rl(-dr) = \sigma d\omega, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi rl$ ,  $\frac{d\omega}{dl} = 2\pi(l \frac{dr}{dl} + r)$ ,  $V = \pi r^2 l$ .

Используя условие постоянства объема  $dV / dl = 0$ , можно переписать уравнение (1) в виде:

$$P + P_m 2\pi rl \left(-\frac{2\pi}{ldl}\right) = \sigma \frac{d\omega}{dl}, \quad (3)$$

откуда

$$\sigma = \frac{P}{\pi d} + P_m r. \quad (4)$$

Напряженность магнитного поля отрезка проводника  $l$  в вакууме

$$H = \frac{I}{r} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (5)$$

где  $I$  – сила тока,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы, характеризующие положение зоны ползучести в образце (рис. 2).

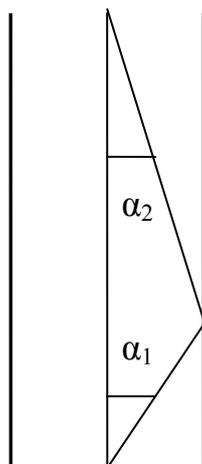


Рис. 2. Положение зоны ползучести образца

В случае симметричной зоны ползучести по длине образца  $\alpha_1 = \alpha_2$  и, следовательно,

$$\sigma = \frac{P}{\pi d} + \frac{I^2}{2\pi r} \cos^2 \alpha, \quad (6)$$

$$\text{где } \cos \alpha = \frac{l}{2} \frac{1}{\sqrt{l^2/4 + d^2/4}} = \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + d^2/l^2}}.$$

Учитывая, что  $d \ll l$ ,  $\cos \alpha$  можно принять равным единице. Тогда:

$$\sigma = \frac{P}{\pi d} \left(1 + \frac{I^2}{P}\right). \quad (7)$$

Вводя в расчетную формулу дополнительный член, связанный с поправкой на магнитное давление, окончательное выражение для поверхностного натяжения может быть представлено в виде:

$$\sigma = \frac{1}{\pi d} \left(P + \frac{\Delta l}{L} p + I^2\right) \quad (8)$$

где  $d$  – диаметр образца при рабочей температуре,  $L$  – плечо рычага от точки опоры до образца,  $p$  – вес компенсационного грузика,  $I$  – сила тока,  $P$  – вес нижней части образца.

Как показали расчеты, поправка на пинч-эффект  $\Delta\sigma_H$  не является пренебрежимо малой и превышает точность измерений  $\sigma$  данным методом. Например, для меди она составила  $\Delta\sigma_H = 58$  мДж/м<sup>2</sup>.

### Библиографический список:

1. **Хоконов, Х.Б.** Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах / Х.Б. Хоконов. – Кишинев: Штиинца. – 1973. – С. 231-236.
2. **Шебзухова, И.Г.** Поверхностное натяжение некоторых легкоплавких металлов в твердом состоянии / И.Г. Шебзухова, Х.Б. Хоконов, С.Н. Задумкин // Физика металлов и металловедение. – 1972. – Т. 33. – № 5. – С. 1112-1113.

3. Пат. 2314515 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G01N 13/02. Способ измерения поверхностного натяжения металлов в твердой фазе / М.В. Гедгагова, В.К. Кумыков, В.А. Созаев, Х.М. Гукетлов, А. Х-М. Байсиев; заявитель и патентообладатель Кумыков В.К. – № 2005120883/28; опубл. 10.01.08, Бюл. 2008, № 1. – 6 с.
4. Пат. 2291413 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G01N 13/02. Устройство для измерения поверхностного натяжения металлов в твердой фазе / Х.М. Гукетлов, М.В. Гедгагова, В.К. Кумыков, В.А. Созаев, А.Х-М. Байсиев; заявитель и патентообладатель Кумыков В.К. – № 2005120884/28; опубл. 10.01.07, Бюл. 2007, № 1. – 5 с.
5. **Кумыков, В.К.** Установка для высокотемпературного нагрева в вакууме тугоплавких металлов и сплавов / В.К. Кумыков, Х.М. Гукетлов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – № 6. – С. 35-36.
6. **Дигилов, Р.М.** Измерение поверхностного натяжения тугоплавких металлов в твердом состоянии / Р.М. Дигилов, С.Н. Задумкин, В.К. Кумыков, Х.Б. Хоконов // Физика металлов и металловедение. – 1976. – Т. 41. – № 5. – С. 920-982.
7. **Digilov, R.M.** The measurement of the surface tension of refractory in the solid state / R.M. Digilov, V.K. Kumykov, Kh.B. Khokonov // Physics of Metals and Metallography. – 1976. – V. 41. – № 5. – P. 68-71.
8. **Kumikov, V.K.** The measurement of the surface tension of some pure metals in the solid state / V.K. Kumikov // Materials Science and Engineering. – 1983. – V. 60. – P. 23-24.
9. **Кумыков, В.К.** Поверхностное натяжение некоторых редкоземельных металлов в твердом состоянии / В.К. Кумыков, Х.М. Гукетлов // Физика металлов и металловедение. – 1983. – Т. 56. – № 2. – С. 408-409.
10. **Кумыков, В.К.** Исследование поверхностного натяжения, работы выхода электрона стали X18H10T и адгезии к ней ртути и амальгамы таллия / В.К. Кумыков, Х.М. Гукетлов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 3. – С. 43-44.
11. **Кумыков, В.К.** Измерение поверхностного натяжения материалов электронной техники / В.К. Кумыков, Х.М. Гукетлов, М.В. Гедгагова // Известия РАН. Серия физическая. – 2006. – № 4. – С. 593-595.
12. **Kumykov, V.K.** Measurement of surface tension of electronic materials / V.K. Kumykov, Kh.M. Guketlov, M.V. Gedgagova // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2006. – V. 70. – № 4. – P. 677-680.
13. **Кумыков, В.К.** Поверхностное натяжение цветных металлов на границе раздела твердая фаза – собственный пар / В.К. Кумыков, М.В. Гедгагова, А.Р. Манукянц // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2006. – № 4. – С. 44-47.
14. **Гедгагова, М.В.** О высокотемпературных измерениях поверхностного натяжения металлов в условиях вакуума / М.В. Гедгагова, Х.М. Гукетлов, В.К. Кумыков, А.Р. Манукянц, И.Н. Сергеев, В.А. Созаев // Известия РАН. Серия физическая. – 2007. – № 5. – С. 631-633.
15. **Gedgagova, M.V.** High-temperature measurements of surface tension of metals in vacuum / M.V. Gedgagova, Kh.M. Guketlov, V.K. Kumykov, A.R. Manukyants, I.N. Sergeev, V.A. Sozaev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2007. – V. 71. – № 5. – P. 608-610.