

ЕЛЕКТРОН-ФОНОННА ВЗАЄМОДІЯ У КОНДЕНСАТАХ МІДІ

О.А.Білоус, асп.; В.С.Кшнякін,* доц.; В.О.Черкаська, студ.;
А.М.Чорноус, доц.

(*Сумський державний педагогічний інститут)

ВСТУП

Дослідження фізичних властивостей плівок міді постійно перебуває у полі зору науковців (див., наприклад, [1-7]). Значний інтерес, у першу чергу, пов'язаний з широким використанням покриттів та конденсатів із міді у електронній та електротехнічній галузі промисловості. Крім цього, плівки міді являють собою унікальні об'єкти для вивчення фізичних явищ у тонкопліткових структурах, що пов'язано із сферичністю поверхні Фермі. У даній роботі подано результати дослідження температурної залежності питомого опору та температурного коефіцієнта опору (ТКО) плівок міді товщиною 50-400 нм.

ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ

У самому загальному випадку залежність від температури (Т) питомого опору для масивного зразка (ρ_0) описується відомим співвідношенням [8]:

$$\rho_0 = \rho_{\text{зал}} + AT^2 + B \left(\frac{T}{\Theta_{OD}} \right)^3 J_3 \left(\frac{\Theta_{OD}}{T} \right) + C \left(\frac{T}{\Theta_{OD}} \right)^5 J_5 \left(\frac{\Theta_{OD}}{T} \right), \quad (1)$$

де $\rho_{\text{зал}}$ - залишковий опір; А,В,С- константи електронної взаємодії; Θ_{OD} - температура Дебая;

$$J_n \left(\frac{\Theta_{OD}}{T} \right) = \int_0^{\Theta/T} \frac{x^n dx}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})} - \text{інтеграл Дебая} \left(x = \frac{\Theta_{OD}}{T} \right).$$

Другий доданок у виразі (1) пов'язаний з електрон-електронною взаємодією і дає вклад в опір при $T < 10\text{К}$, наступний - з моттовським s-d-розсіюванням, а останній - з електрон-фононою взаємодією. У зв'язку із зменшенням різниці розсіювання електронів на великі та малі кути вклад електрон-фононої взаємодії у плівках стає пропорційним T^3 , а не T^5 [9]. Таким чином, вираз, що описує залежність питомого опору плівки (ρ), можна записати у вигляді [10-12]:

$$\rho = \rho_{\text{зал}} + aT^2 + c^* \left(\frac{\Theta_D}{T} \right) J_3 \left(\frac{\Theta_D}{T} \right), \quad (2)$$

де $c^* = b + c$ - ефективний параметр електрон-фононої взаємодії (а, b, c - коефіцієнти, аналогічні А, В, С); Θ_D - температура Дебая плівки.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівки міді були отримані при температурі підкладки 300 К у вакуумі порядку 10^{-3} Па (ВУП-5М) шляхом термічного випаровування зі швидкістю 1,5-3 нм/с. Як підкладки для вимірювання електричного опору використовувались скляні поліровані пластини з чотирма вплавленими молібденовими стержнями-контактами, розміщеними на одній лінії. Ширина і відстань між контактами складають 0,70 та 3,35 мм

відповідно. Опір вимірювався за чотирьохточковою схемою з точністю $\pm 0,01$ Ом за допомогою міліомметра Е6-18/1.

Отримані конденсати після термообробки мають ГЦК-структуру, причому відношення $\frac{|a_0 - a|}{a_0}$ (де a_0, a - параметри решітки масивного

зразка міді та плівки відповідно) у дослідженому інтервалі товщин у середньому складає 0,003. Для визначення товщини (інтерферометр Лінника) та вивчення фазового складу (рентгенівський дифрактометр ДРОН-2.0) використовувались пластини із скла розміром 15×15 мм.

Термообробка плівок здійснювалась за схемою "нагрівання \leftrightarrow охолодження" в інтервалі температур 280-680 К протягом трьох циклів. Температура вимірювалась за допомогою мідь-константанової термопари. Рисунок 1 ілюструє типову залежність опору (R) від температури для плівок товщиною 130 та 380 нм.

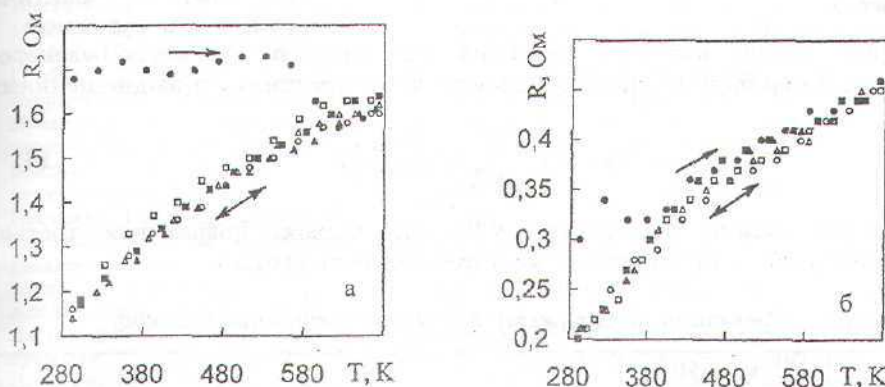


Рисунок 1 - Залежність R від T для трьох циклів «нагрівання \leftrightarrow охолодження» для плівок Si товщиною 130 нм. (а) та 360 нм (б): $\bullet, \square, \triangle$ - I, II, III цикл

Як видно з рисунка, під час першого відпалювання на деяких ділянках залежності спостерігається зменшення опору з підвищенням температури. Названа особливість пов'язана з дефектами кристалічної будови у свіжосконденсованих зразках. Розрахунок функції розподілу $F_0(E)$, яка описує спектр дефектів у плівкових зразках з використанням методики Венда (див., наприклад, [13]) показав наступне. У свіжосконденсованих зразках існують структурні дефекти декількох різних типів, для яких енергія активації (E_m) складає $E_{m1}=0,40-0,70$; $E_{m2}=0,75-0,80$; $E_{m3}=0,83-0,92$ еВ. Отриманий результат непогано узгоджується з даними інших авторів (див., наприклад, [14]). Таким чином, можна говорити, що плівки в процесі відпалювання пройшли повну термообробку.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 2 наведена типова залежність ρ та ТКО (β) на прикладі плівки товщиною 260 нм. На залежності $\rho(T)$ та $\beta(T)$ спостерігаються особливості поблизу температури Дебая. У інтервалі 270 К- Θ_D залежність $\rho(T)$ спрямовується в координатах $\rho \sim T^n$ ($n=2+3$), що пов'язано з електрон-фононою взаємодією. Вище Θ_D залежність стає лінійною з дещо відмінним тангенсом кута нахилу в інтервалі температур $\Theta_D - 490$ К та 490-680 К. Із збільшенням товщини різниця між величиною тангенса

кута нахилу кривої зменшується. На залежності $\beta(T)$ в точці зміни тангенсу кута нахилу кривої $\rho(T)$ спостерігаються особливості у вигляді

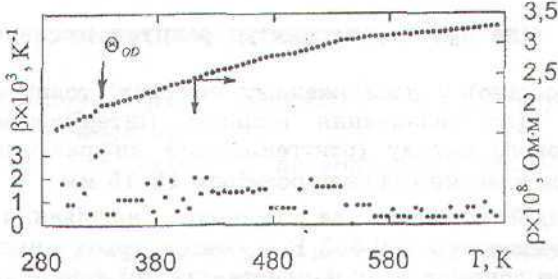


Рисунок 2 - Залежність питомого опору (1) та ТКО від температури для плівки Si товщиною 260 нм.

таблиці також наведено значення ефективного параметра електрон-фононої взаємодії c^* , який обрахований за наступним співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \alpha = c * \frac{T^2}{\Theta_D^3} J_3 \left(\frac{\Theta_D}{T} \right), \quad (8)$$

де α -кут нахилу залежності $\rho(T)$ для плівок. Розрахунок третього інтегралу Дебая здійснювався методом Сімпсона [16].

Таблиця - Ефективний параметр електрон-фононої взаємодії

d, нм	tg $\alpha \cdot 10^{10}$, Ом·м · К ⁻¹	$c^* \cdot 10^8$, Ом·м		
		550 К	600 К	650 К
55	0,70	2,78	2,54	2,34
75	0,50	2,05	1,87	1,72
130	0,27	1,14	1,04	0,96
135	0,28	1,18	1,08	0,99
225	0,25	1,05	0,91	0,89
265	0,25	1,07	1,02	0,90
380	0,25	1,09	0,99	0,92

Збільшення параметра c^* із зменшенням товщини автори [10-12] пов'язують із підсиленням високотемпературної електрон-фононої взаємодії, яка виявляється внаслідок зсуву фононного спектра із області низьких частот в область більш високих. Потрібно відзначити те, що зсув фотонного спектра для плівок, порівняно з масивними зразками, приводить до зменшення температури Дебая. Результати наших досліджень вказують, що в інтервалі товщин 50-400 нм температура Дебая змінюється від 325 К до 343 К.

ВИСНОВКИ

1 Показано, що на температурній залежності питомого опору та ТКО мають місце особливості при температурі Дебая, яка є розмірно-залежною величиною.

2 Величина тангенса кута нахилу залежності $\rho(T)$ та значення ефективного параметра електрон-фононої взаємодії збільшуються із зменшенням товщини плівки у інтервалі 500-130 нм та не залежать від товщини, починаючи з 130 нм.

Автори висловлюють подяку В.В.Кулішу за допомогу у проведенні експериментальних досліджень.

SUMMARY

The temperature dependence of resistivity (ρ) and temperature coefficient of resistivity (β) were studied in the thickness range 50-400 nm. The curve of $\rho(T)$ and $\beta(T)$ show curvatures lie in the range Debye temperature. The electron-phonon interaction parameter increases with decreasing thickness.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Narayandas K., Radnakrishnan M., Balasubramanian C. Defect density and electrical properties of vacuum evaporated copper films from annealing studies of electrical resistance // *Electro Component Science and Technology*.-1982.-№9.-P.171-178.
2. Narayandas K., Radnakrishnan M., Balasubramanian C. Dependence of defect density and activation energy on deposition rates in copper films // *Jornal of Materials Science*.-1981.-№16.-P.549-552.
3. Исламгалиев Р.К., Ахмадеев Н.А., Мулюков Р.Р., Валиев Р.З. Влияние субмикросернистого состояния на электросопротивление меди // *Металлофизика*.-1991.-Т.13. - №3.-С.20-25.
4. Грибок В.С., Заблудовский В.А. Структура и свойства электролитических медных покрытий, полученных в импульсных режимах // *МФИНТ*.-1998.-Т.20. - №19.-С.53-57.
5. Проценко І.Ю., Опанасюк Н.М., Черноус А.М. Апробація трьохвимірної моделі тензочувливості металевих плівок // *ВАНТ*.-1998.-№2(3),3(4).-С.107-110.
6. Гладких Н.Т., Крышталъ А.П. Изменение параметра решетки в островковых вакуумных конденсатах Cu, Ag, Au // *ВАНТ*.-1998.-№2(3),3(4).-С.57-65.
7. Проценко І.Ю., Шовкопляс О.В., Овчаренко Ю.М., Опанасюк Н.М. Електрофізичні властивості тонких полікристалічних плівок Cr, Cu, Ni та Ti // *Журнал фізичних досліджень*.-1998.-Т.2. - №1.- С.105-108.
8. Электрическое сопротивление тугоплавких металлов: Справочник / Под ред. А.Е.Шейдлина.-Москва: Энергия, 1981.-90 с.
9. Ларсон Д.К. Размерные эффекты в электропроводности тонких металлических пленок и проволок / В книге: Физика тонких пленок.-Москва: Мир.-1973.-Т.6.-С.97-170.
10. Проценко І.Е., Смолин М.Д., Шамога В.Г., Яременко А.В. Размерная и температурная зависимости электросопротивления пленок кобальта в области промежуточных температур // *УФЖ*.-1984.-Т.29. - №6.-С.920-925.
11. Лобода В.Б., Проценко І.Е., Смолин М.Д., Яременко А.В. Исследование размерных и температурных эффектов в тонких пленках переходных металлов // *УФЖ*.-1985.-Т.30. - №3.-С.435-440.
12. Проценко І.Е., Смолин М.Д., Яременко А.В., Лобода В.Б. Температурная зависимость удельного сопротивления тонких пленок переходных d-металлов // *УФЖ*.-1988.-Т.33. - №6.-С.875-880.
13. Технология тонких пленок: Справочник / Под ред. Р.Майссела, Р.Глекга.-Москва: Советское радио, 1977. - Т.2. - 768 с.
14. Однодворец Л.В., Овчаренко Ю.М., Опанасюк Н.Н., Проценко І.Е., Черноус А.Н. Электрофизические свойства одно- и многослойных пленок металлов. I Удельное сопротивление и тензочувствительность однослойных пленок // *Вісник Сумського державного університету*.-1996.-№1(5).-С.9-17.
15. Шматко О.А., Усов Ю.В. Структура и свойства металлов и сплавов. Электрические и магнитные свойства металлов и сплавов. Справочник.-Киев: Наукова думка, 1987.-581 с.
16. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике.-Москва: Наука.-1965.-872 с.

Надійшла до редколегії 12 лютого 1999 р.

УДК 622.621.928.8

СТАЦИОНАРНЫЕ ПОТОКИ ЖИДКОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ИГЛЫ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

С.В. Горобец*, *вед.науч.сотр.*; И.А. Мельничук**, *канд. физ.-мат. наук*
(* Украинский государственный университет пищевых технологий,
**Донецкий госуниверситет)

В настоящее время повысился интерес к воздействию магнитных полей на различные жидкие растворы с целью изучения как физических явлений, происходящих в них, так и для совершенствования технических