

М.М. Козак, Б.Л.Мельничук, Б.Р. Пенюх, З.В. Стасюк
Перенос заряду в тонких плівках свинцю

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Драгоманова, 50, Львів, 79005*

В умовах надвисокого вакууму досліджено електропровідність тонких плівок свинцю (2-100 нм), нанесених на чисту та попередньо покриту підшаром германію (0.6-3 нм) поверхню скла. Показано, що сурфактантні підшари германію призводять до зменшення товщини плівки, що відповідає порогові протікання струму через свинцеву плівку. Розмірні залежності питомого опору плівок пояснено у рамках сучасних модельних уявлень про класичний та внутрішній розмірні ефекти.

Ключові слова: тонкі металеві плівки, класичний та внутрішній розмірний ефект, поверхнєве розсіювання носіїв струму.

Стаття постуила до редакції 20.01.2008; прийнята до друку 15.06.2008.

Вступ

Вивчення фізичних властивостей плівок дозволяє отримати не тільки надзвичайно цінну інформацію, необхідну для розуміння фундаментальних властивостей твердих тіл та їхньої поверхні, а й передбачити особливості технології виготовлення тонкопліткових елементів із прогнозованими властивостями. Подальша мініатюризація електронних пристроїв та поява нанотехнологій призвели до необхідності вивчення надтонких (в ряді випадків – субатомних) плівок металів перспективних з точки зору використання їх в якості провідних і резистивних елементів мікроелектронних пристроїв.

Особливо цікавими є роботи останніх років [1-3], в яких показано можливість створення провідних плівок товщиною в декілька нанометрів шляхом попереднього нанесення на діелектричну підкладку сурфактантних підшарів, що змінюють умови росту в гетероепітаксціальних системах і сприяють переходу від острівцевих до суцільних плівок. Тому проведення комплексного дослідження структури і розмірних залежностей різних кінетичних коефіцієнтів ультратонких плівок і сумісне трактування отриманих результатів становить значний науковий і практичний інтерес.

Метою дослідження було встановлення закономірностей зміни електропровідності тонких плівок свинцю під впливом поверхневого і зерномежового розсіювання носіїв струму та наявності на поверхні діелектричної підкладки сурфактантного германієвого підшару в процесі зміни їхньої товщини.

I. Методика експерименту

Дослідження електричних властивостей проводили у відпаяних скляних експериментальних приладах при тиску залишкових газів, що не перевищував 10^{-7} Па. При проведенні експерименту, особлива увага зверталась на докладну дегазацію підкладки, випаровувачів свинцю і германію та інших конструктивних елементів вакуумного приладу.

Плівки свинцю різної товщини одержували шляхом послідовного допилення металу на охолоджену до 78 К підкладку (поліроване і оплавлене скло). Швидкість осадження пари металу не перевищувала 0,05 нм/с. Підшар германію товщиною у декілька атомних шарів наносили на охолоджену підкладку безпосередньо перед конденсацією свинцю. Після напилення плівки протягом 1 години відпалювали при 370 К для стабілізації їх властивостей. Товщину отриманих плівок визначали за зсувом резонансної частоти п'єзокварцового вібратора.

Опір плівок вимірювали з допомогою двозондової методики цифровим мультиметром В7-34А. Опір плівки сурфактанта завжди перевищував 10^8 Ом.

II. Результати експерименту та їх обговорення

Структурні дослідження показали, що в умовах малої швидкості нанесення матеріалу плівки (не більшої за 0,1 нм/сек) і низькотемпературного відпалу (Твідп=370 К) можна отримати однорідні полікристалічні зразки з ґраткою, аналогічною до

гратки масивного свинцю, ізотропні в площині плівки. Середнє значення лінійних розмірів кристалітів D у площині, паралельній до підкладки було в межах від 38 до 42 нм. Нанесення підшару германію призводить до зменшення середнього лінійного розміру кристалітів (23 нм – при товщині германію 1,2 нм та 20 нм – при $d_{Ge}=2,6$ нм).

На Рис. 1 наведено залежності питомого опору ρ від товщини d плівок свинцю, нанесених на чисте поліроване скло (крива 1) та скло, покрите підшарами германію різної товщини (криві 2 і 3). З даних, зображених на рисунку видно, що при збільшенні товщини підшару германію має місце зсув порогу протікання струму в область менших товщин плівок свинцю. Тобто при наявності сурфактантного підшару суттєво знижується процес коагуляції зародків металу на поверхні підкладки.

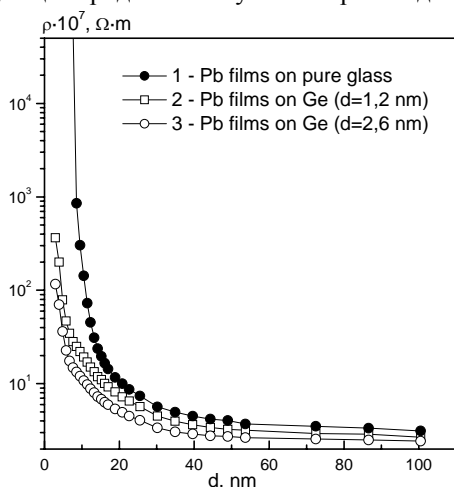


Рис. 1. Розмірні залежності питомого опору свинцевих плівок при температурі 78 К.

Для трактування розмірних залежностей використано теоретичні моделі класичного і внутрішнього розмірного ефекту. Зокрема, за допомогою моделі Фукса-Зондгеймера [4] проведено оцінку параметрів дуже товстої плівки ($d \rightarrow \infty$), структура якої аналогічна структурі отриманих плівок. Згідно з цією моделлю розмірну залежність питомого опору можна описати наступним чином:

$$\frac{\rho}{\rho_{\infty}} = 1 + \frac{3\lambda(1-p)}{8d}, \quad (1)$$

де ρ_{∞} – питомий опір безмежно товстої плівки ($d \rightarrow \infty$); λ – середня довжина вільного пробігу носіїв струму у плівці; p – коефіцієнт дзеркальності відбивання носіїв струму зовнішніми поверхнями плівки. З виразу (1) випливає, що залежності добутків питомого опору і товщини плівки мають бути лінійними функціями товщини. В області товщин $d > 30$ нм вони справді лінійні (див. Рис. 2). За нахилом цих прямих проведено оцінку ρ_{∞} і λ (Табл. 1)

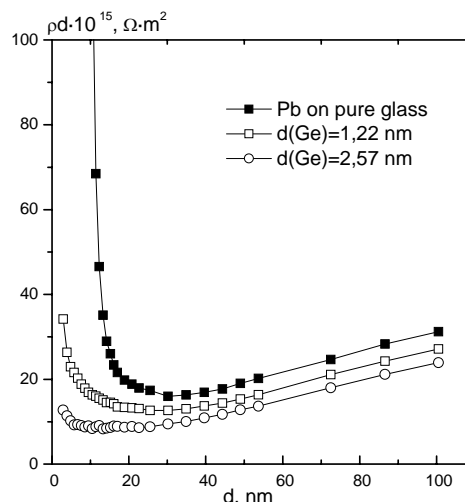


Рис. 2. Розмірні залежності ρd плівок свинцю при температурі 78 К/

Таблиця 1

Значення ρ_{∞} і λ у плівках свинцю при $T = 78$ К.

Товщина германію, нм	$\rho_{\infty} \cdot 10^{-6}$, Ом·м	λ , нм
0	0,233	90
1,2	0,248	56
2,6	0,275	34

Порівняння величини ρ_{∞} з питомим опором масивного металу ρ_0 дає змогу врахувати внесок зерномежового розсіювання в сумарний опір плівки. Згідно з теорією Маядаса-Шацкеса (МШ) [5]:

$$\frac{\rho_0}{\rho_{\infty}} = f(\alpha), \quad f(\alpha) = 3 \left(\frac{1}{3} - \frac{a}{2} + \alpha^2 - \alpha^3 \ln \left(1 + \frac{\alpha}{2} \right) \right)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{D} \cdot \frac{r}{1-r} \quad (2)$$

де λ_0 – середня довжина вільного пробігу носіїв струму в масивному металі, D – середній лінійний розмір кристалітів, з яких складається плівка; r – коефіцієнт зерномежового розсіювання.

Поряд з цим для полікристалічних плівок згідно з теорією Тельє-Тоссе-Пішара (ТПП) [6]:

$$\frac{\rho_{\infty}}{\rho_0} \approx 1 + \frac{3 \cdot \lambda_0}{D} \cdot \frac{1-t}{1+t} \quad (3)$$

Де t – коефіцієнт проходження носіями струму міжзеренних меж, причому $r/(1-r) = 2(1-t)/(1+t)$. Результати розрахунку параметрів переносу заряду в плівках свинцю наведено у Табл. 2. Як бачимо, результати розрахунку в рамках різних моделей не дуже відрізняються між собою.

В області товщин $d < 30$ нм розмірні залежності ρd нелінійні (див. Рис.2). Цей факт можна пояснити відхиленням реальної будови плівки від моделі плоскопаралельного шару, покладеної в основу моделей МШ і ТПП. Реальна плівка володіє неоднорідностями товщини, сумірними лінійним розмірам кристалітів, з яких вона складається. Тому для трактування отриманих даних було використано модель полікристалічного шару неоднорідної товщини [7], згідно з якою:

$$\rho = \frac{\rho_0}{f(\alpha)} \left[1 - \left(\frac{h}{d} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \cdot \left\{ 1 + \frac{3 \cdot \lambda_0 \cdot f(\alpha)}{8 \cdot d} \cdot \left[1 - \left(\frac{h}{d} \right)^2 \right]^{-1} \right\} \quad (4)$$

де h – параметр, що має зміст амплітуди макроскопічних неоднорідностей товщини плівки.

Таблиця 2

Параметри переносу заряду у плівках свинцю при $T = 78$ К.

Товщина Ge, нм	0		1,2		2,6	
	МШ	ТПП	МШ	ТПП	МШ	ТПП
λ_0	120	120	70	70	56	56
r	0,14	0,13	0,22	0,23	0,29	0,30
t	0,85	0,86	0,73	0,75	0,67	0,67

Порівняння експериментальних даних з виразом (4) дало змогу оцінити величину h для досліджуваних плівок. Обчислення показує, що залежність виражена з допомогою (4), добре узгоджується з експериментальними залежностями при $h = 12$ нм для плівок свинцю, нанесених на чисті скляні підкладки та $h = 3-4$ нм – для плівок свинцю осаджених на підшар германію.

Висновки

1. Дослідження структури свинцевих плівок методами електронної мікроскопії і електронографії показали, що отримані зразки є дрібнодисперсними, полікристалічними та ізотропними у площині плівки і володіють кристалічною ґраткою, характерною для

масивного металу. Це дозволяє стверджувати, що спостережувані нами розмірні залежності кінетичних коефіцієнтів зумовлені лише додатковими внесками розсіювання носіїв струму поверхніми плівок та границями кристалітів, а не впливом зміни їх структури.

2. Отримані залежності питомого опору свинцевих плівок трактовано в рамках моделі, що вважає адитивними процеси розсіювання носіїв струму: об'ємне, зерномежове та два види поверхневого розсіювання (недосконалістьми поверхні плівки атомного масштабу та макроскопічними неоднорідностями поверхні, обумовленими дрібнозернистою будовою плівки). В рамках даної моделі розраховані значення середньої довжини вільного пробігу носіїв струму та імовірності міжзеренного тунелювання, що повністю характеризують перенос заряду в плівці

3. Показано, що наявність підшару германію товщиною 0,6–3 нм суттєво послаблює коагуляцію зародків в процесі росту плівки і дає змогу отримати електропровідні шари товщиною 3-5 нм.

Козак М.М. – науковий співробітник.

Мельничук Б.Л. – кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Пенюх Б.Р. – кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Стасюк З.В. – доктор фізико-математичних наук, професор.

- [1] K. Schroder, Le Zhang. Unusual Low Resistivity of Sub-nm Thick Cr Overlayers on Ge Substrates // *Phys. Stat. Sol. (b)*, **183**, pp. k5-k8 (1994).
- [2] T. Lewowski, P. Wiczorek. Surfactant Effect of Sb on the Growth of Ag Films on Sapphire Substrate // *Appl. Surf. Sci.*, **93**, pp. 85-87 (1996).
- [3] З.В. Стасюк, М.М. Козак, Б.Р. Пенюх, Р.І. Бігун. Вплив алюмінієвих та германієвих субатомних сурфактантних шарів на перенос заряду в тонких паладієвих плівках // *ФХТТ*, **3**(3), сс. 418-422 (2002).
- [4] E. H. Sondheimer. The Mean Free Path of Electrons in Metals // *Adv. Phys.*, **1**, pp. 1-42 (1952).
- [5] M. A. Angadi. Some transport properties of transition metal films. // *Journ. Matter. Sci.*, **20**(3), pp.761-796 (1985).
- [6] H. Tijani, C.R. Pichard, A.J. Tosser. Isotropy of the Grain Boundary Scattering in the Framework of a Multidimensional Conduction Model // *Journ.Mat.Sci.*, **6**(9), pp. 1107-1109 (1987).
- [7] З. В. Стасюк, А. І. Лопатинський. Розмірні кінетичні явища в тонких плівках металів. Класичні ефекти // *ФХТТ*, **2**(4), сс. 521-542 (2001).

М.М. Kozak, B.L. Melnichuk, B.R. Penyukh, Z.V. Stasyuk

The Charge Transport Phenomena in Thin Lead Films

'Ivan Franko' Lviv National University
50, Dragomanova Str., Lviv, 79005, Ukraine

The electrical conductivity of lead thin films (ranging in thickness from 2 to 100 nm) deposited on polished glass surface and glass surface predeposited with germanium surfactant layers has been investigated under ultrahigh vacuum conditions. It was shown that subatom Ge layers (mass thickness 0.6-3 nm) hastened Pb films metallization. The experimental results were interpreted by invoking models, which take into account charge carrier scattering by the external surfaces of the film (include scattering by surface roughness) and by grain boundaries. The charge transport parameters were calculated and the amplitude of surface roughness was estimated.