

Р.І. Бігун, А.Я. Пастирський, Б.Р. Пенюх, З.В. Стасюк

Вплив сурфактантних підшарів германію на електропровідність свіжонанесених плівок срібла нанометрової товщини

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

В умовах надвисокого вакууму досліджено електропровідність плівок срібла, нанесених на поверхню скла та поверхню скла, покриту підшаром германію. Сурфактантні підшари германію (масова товщина 0.5-5,3 нм) прискорюють металізацію плівок срібла, що проявляється у зниженні товщини d_{\min} плівки срібла, при якій виникає поріг протікання струму через плівку (*percolation threshold*). 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, поверхневе розсіювання носіїв струму.

Стаття поступила до редакції 25.07.2007; прийнята до друку 15.02.2008.

I. Вступ

Формуванню дуже тонких суцільних металевих шарів на поверхні діелектричних підкладок перешкоджає коагуляція зародків кристалізації металу, оскільки енергія взаємодії між атомами металу переважає енергію їх взаємодії з атомами підкладки. Тому в плівках малої товщини існує певна порогова товщина d_{\min} (*percolation threshold*), починаючи з якої спостерігається протікання струму в зразку. Величина d_{\min} для конкретної системи підкладка-метал залежить від особливостей технології конденсації пари металу на підкладку. Зниження товщини d_{\min} , а відповідно товщини, при якій плівка стає електрично суцільною з металевим характером провідності, можна досягти за допомогою використання поверхнево активних покриттів субатомної товщини, попередньо нанесених на діелектричну підкладку. Ці покриття протидіють процесам коагуляції зародків кристалізації металу і сприяють формуванню конденсатів, лінійні розміри кристалітів в яких менші за розміри кристалітів в плівках, нанесених на діелектрик з використанням аналогічної технології препарування плівок. Ця методика зниження d_{\min} використовувалась в окремих роботах (наприклад, [1-4]), однак відома з літератури інформація про вплив сурфактантних підшарів на структуру та електричні властивості плівок металів недостатня для прогнозування поведінки дуже тонких металевих плівок, отриманих з використанням даної методики.

У даній роботі досліджено розмірні явища в електропровідності свіжонанесених плівок срібла, конденсованих на поверхні оплавленого полірованого скла та на поверхні скла, попередньо покритого підшаром германію товщиною в декілька атомних шарів.

II. Методика експерименту

Дослідження проводили у відпаяних скляних надвисоковакуумних експериментальних приладах при тиску залишкових газів, що не перевищував 10^{-7} Па. Для нанесення плівок використовували метод термічного випаровування матеріалів. Методика експерименту, яка забезпечувала достатню чистоту препарування плівок, в цілому аналогічна методикам, що використовувались у наших попередніх роботах (наприклад, [3-5]).

Досліджувались електричні властивості свіжоконденсованих на охолоджених до 78 К підкладках плівки. Швидкість осадження пари металу не перевищувала 0,01 нм/с. підшар германію товщиною у декілька атомних шарів наносили на підкладку безпосередньо перед конденсацією срібла. Масову товщину плівок оцінювали за зсувом резонансної частоти п'єзокарцового вібратора з чутливістю не гіршою за 0,2 нм. Масова товщина сурфактантного підшару вибиралась кратною до цілого числа моношарових покриттів (період ґратки кристала германію 0,566 нм). Опір плівок вимірювали з допомогою двозондової методики

цифровим омметром та фіксували комп'ютером. Опір плівки сурфактанта завжди перевищував 10^8 Ом.

Порогом протікання струму в плівках срібла вважалась товщина шару, при якій опір плівки ставав меншим за 10^8 Ом. Всі виміри проведено при $T = 78$ К.

III. Результати експерименту та їх обговорення

На Рис. 1 показані залежності питомого опору ρ від товщини d плівок срібла, нанесених на чисте поліроване скло (крива 1) та скло, покрите підшарами германію різної товщини (криві 2-6). З даних зображених на рисунку видно, що при збільшенні товщини підшару германію має місце зсув порогу протікання струму d_{min} в область менших товщин плівок срібла. У свіжонанесених на чисте скло плівках срібла $d_{min} = 12$ нм, а у плівках нанесених на підшар германію товщиною $d_{Ge} = 5,3$ нм поріг протікання спостерігається у плівках срібла товщиною $d_{min} = 2,5$ нм.

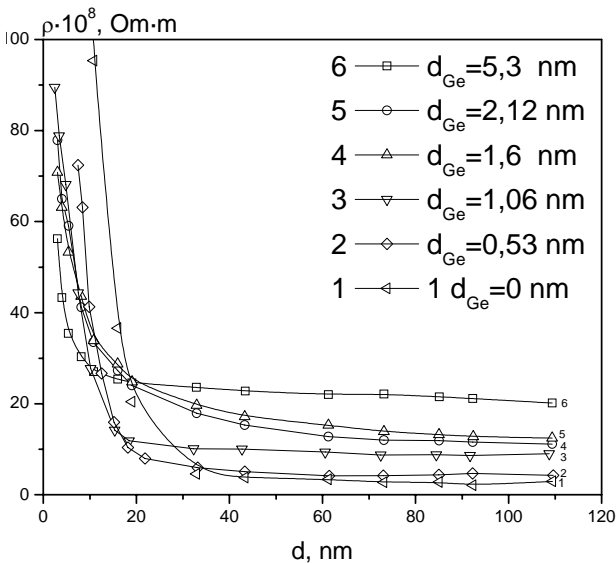


Рис. 1. Розмірні залежності питомого опору ρ свіжонанесених плівок срібла:

Кількісний опис наведених на Рис. 1 розмірних залежностей питомого опору $\rho = \rho(d)$ можна здійснити з допомогою теорії Намба [6], яка враховує наявність в плівці макроскопічних поверхневих неоднорідностей, зумовлених зернистою будовою плівки. Згідно з [6], залежність $\rho = \rho(d)$ може бути записана у вигляді:

$$\rho(d) = \rho_{\infty} \left[1 - \left(\frac{h}{d} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left\{ 1 + \frac{3\lambda}{8d} \left[1 - \left(\frac{h}{d} \right)^2 \right]^{-1} \right\} \quad (1)$$

У виразі (1) ρ_{∞} – питомий опір плівки безмежної товщини ($d \rightarrow \infty$), будова якої ідентична будові

досліджуваної плівки, λ – середня довжина вільного пробігу носіїв струму в матеріалі, h – середня амплітуда макроскопічних поверхневих неоднорідностей. Вираз (1) передбачає повну втрату напрямленої складової імпульса електрона при розсіюванні поверхнею (розсіяння дифузне). При товщинах $d \gg h$, вираз (1) співпадає з наближеним виразом теорії Фукса-Зондгеймера [7], побудованої для однорідних плоскопаралельних шарів:

$$\rho(d) = \rho_{\infty} \left\{ 1 + \frac{3\lambda}{8d} \right\} \quad (2)$$

З (2) видно, що експериментальна залежність від товщини шару d добутку $\rho(d) \cdot d$ повинна бути лінійною. Зауважимо, що лінійність згаданої залежності можлива лише в тих випадках, коли структура плівки не змінюється із зміною товщини. Відхилення від лінійності згаданого добутку звичайно проявляється в плівках малих товщин, коли d стає сумірним середній амплітуді поверхневих неоднорідностей h . Співставляючи експериментальні залежності $\rho(d)$ з виразами (1) і (2) знаходимо ρ_{∞} , λ і h . Результати відповідного розрахунку наведено в Табл. 1

Таблиця 1.

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

d_{Ge} , нм	Орієнтовна кількість моношарів германію	$\rho_{\infty} \cdot 10^8$, Ом·м	λ , нм	h , нм	t
0	0	2,1	40	18,4	0,54
0,53	1	4,1	20	10,8	0,54
1,06	2	6,5	13	6,2	0,65
1,6	3	8,7	10	3,9	0,55
2,1	4	11,8	7	3,1	0,54
5,3	10	14,0	6	2,3	0,60

Аналіз даних, показаних в Табл. 1 показує, що у плівок, нанесених на підшар германію середня довжина вільного пробігу λ та середня амплітуда поверхневих неоднорідностей h зменшуються із збільшенням товщини підшару германію. Зміни згаданих величин достатньо добре корелюють між собою на їх залежності від d_{Ge} (Рис. 2). Величини λ і h асимптотично прямують до $\lambda = 5$ нм та $h = 2$ нм для великих d_{Ge} .

Як видно з таблиці 1, питомий опір плівок срібла безмежної товщини ρ_{∞} зростає із збільшенням товщини підшару германію, що свідчить про зростання дефектності плівок срібла. Одним з можливих механізмів додаткового розсіювання носіїв, що впливають на перенос заряду в плівках є розсіювання носіїв струму міжзерниними межами. Оскільки підшар германію впливає на середню амплітуду поверхневої шорсткості плівок, природно припустити, що причиною даного явища є зміна середніх лінійних розмірів кристалітів у плівці. В літературі відзначалося, що середня амплітуда

поверхневих неоднорідностей сумірна половині діаметра зерна D у шарі, тобто $h \sim D/2$.

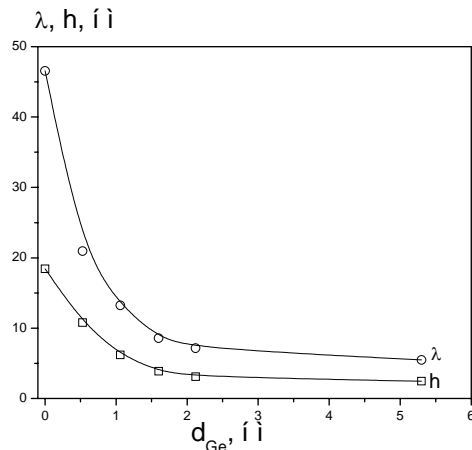


Рис. 2. Залежність λ і h плівок срібла від товщини підшару германію.

Якщо виходити з даного припущення, то для опису спостережуваних явищ можна використати теорію внутрішнього розмірного ефекту Тельє, Тосе і Пішара [8, 9], яка вважає зерномежове розсіяння носіїв струму адитивним об'ємному (наявному в масивному матеріалі) та поверхневому розсіянню. Згідно з [8, 9], співвідношення між питомим опором безмежно товстої плівки ρ_∞ і питомим опором масивного кристала ρ_0 може бути записане:

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

де λ_0 – середня довжина вільного пробігу носіїв струму в масивному кристалі, t – імовірність міжзеренного тунелювання носіїв струму ($0 \leq t \leq 1$).

Згідно з [10] середня довжина вільного пробігу носіїв струму в масивному сріблі

при $T = 78$ К $\lambda_0 = 279,3$ нм, а $\rho_0 = 0,3024 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Якщо використати вираз (3), з експериментальних даних можна розрахувати величини t , вважаючи, що $D = 2h$. Результати розрахунку t наведено в таблиці 1. Виявилось, що розрахована величина t добре узгоджується із результатами подібних розрахунків, виконаних для плівок срібла іншими авторами, зокрема з даними [11].

IV. Висновки

1. В результаті дослідження впливу сурфактантних підшарів германію на електропровідність плівок срібла показано, що вплив цього шару призводить до формування більш дрібнодисперсних полікристалічних шарів срібла, ніж у випадку конденсації металу на чистій діелектричній підкладці.
2. Результати дослідження електропровідності плівок срібла пояснено на основі існуючих модельних уявлень про перенос заряду в плівках металів. Знайдено параметри переносу заряду в плівках срібла.

Бігун Р.І. – молочий науковий співробітник кафедри фізичної і біомедичної електроніки.

Пастирський Я.А. – старший викладач кафедри фізичної і біомедичної електроніки,

Пенюх Б.Р. – доцент кафедри фізичної і біомедичної електроніки.

Стасюк З.В. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізичної і біомедичної електроніки.

- [1] K. Schroder, Le Zhang. Unusual Low Resistivity of Sub-nm Thick Cr Overlayers on Ge Substrates // Phys. Stat. Sol. (b), **183**, p. 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), с. 418–422 (2002).
- [4] А. Бородчук, О. Дорош, З. Стасюк. Вплив субатомних підшарів сурми на металізацію плівок срібла та міді. // ВЛУ. Серія фізична, **33**, с. 328-332 (2000).
- [5] Р.І. Бігун, З.В. Стасюк. Перехід від квантового до класичного переносу заряду в тонких плівках міді // ФХТТ, **6**(3), с. 414–417 (2005).
- [6] Y. Namba. Resistivity and its Temperature Coefficient of Thin Metal Films with Rough Surface // Jap. J. Appl. Phys., **9**, pp. 1326 - 1329 (1970).
- [7] E. H. Sondheimer. The Mean Free Path of Electrons in Metals // Adv. Phys. **1**, pp. 1 - 42 (1952).
- [8] H. Tijani, C.R. Pichard, A.J. Tossier. Isotropy of the Grain Boundary Scattering in the Framework of a Multidimensional Conduction Model // Journ. Mat. Sci. **6**(9), pp. 1107 - 1109 (1987)
- [9] M. Bedda, C.R. Pichard, A.J. Tossier. Numerical Aproximations for Transport Parameters in the Framework of Multidimensional Conduction Models // Journ. Mat. Sci. **21**, p. 1405 - 1412 (1986).
- [10] И. К. Кикоин. Таблицы физических величин. Справочник. - М.: Атомиздат, 624 с. (1976).
- [11] E.J. Tochtiskij, N.M. Belyavskij. Grain-Boundary Electron Scattering Effect on Metal Film Resistivity // Phys. Stat. Solid (a), **61**, pp. K21 - K24 (1980).

R.I. Bihun, A.Y. Pastyrsky, B.R. Penyukh, Z.V. Stasyuk

The Influence of Germanium Surfactant Sub-Layers on Electron Transport in Nanometer Thick as-Grown Silver Films

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

The electrical properties of Ag nanometer thick films deposited on polished glass surface and glass surface predeposited with germanium surfactant layers were investigated. It was shown that subatom Ge layers (mass thickness 0.5 - 5.3 nm) hastened Ag films metallization. Predeposited Ge surfactant layer course formation of more fine-dyspersated thin Ag films. The experimental results were explained within the framework of the classical and internal size effect theories.