

М.Д. Бучковська, Р.І. Бігун, З.В. Стасюк, Б.Р. Пенюх, Я.А. Пастирський
Вплив підшарів алюмінію на поріг протікання струму в тонких плівках марганцю

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

Подано результати дослідження електричних властивостей свіжнанесених ультратонких плівок марганцю. Виявлено, що попередньо нанесений підшар алюмінію субатомної товщини прискорює металізацію плівок марганцю. Залежності питомого опору плівок марганцю від їхньої товщини описано з допомогою теорії класичного і квантового перенесення заряду в зразках обмеженої товщини. Появу металевого характеру провідності в плівках пояснено в рамках перколяційної моделі. Підшар алюмінію сприяє 2D механізму росту плівки марганцю.

Ключові слова: тонкі металеві плівки, перколяційна модель, класичний та квантовий розмірні ефекти.

Стаття постуила до редакції 20.05.2012; прийнята до друку 15.06.2012.

Вступ

Розвиток сучасної електроніки неможливий без мікромініатюризації електронних систем з використанням нанотехнологій, зокрема без розробки методик формування стабільних покриттів субатомної товщини. Властивості ультратонких шарів можуть суттєво відрізнятися від властивостей відносно товстих шарів, які у даний час використовуються у мікроелектроніці. Ця відмінність перш за все зумовлена домінуючим впливом явищ на поверхні ультратонкої плівки на її будову та електричні властивості.

Відкритим питанням залишається вивчення особливостей режиму росту та переходу структури плівки металу від острівцевої до електрично суцільної та вивчення умов впливу на даний перехід [1]. Приготування ультратонких електрично суцільних металевих плівок з металевим характером перенесення заряду на поверхні діелектричних підкладок є достатньо складним технологічним завданням внаслідок коагуляції частинок металу при його конденсації на поверхні діелектрика. Внаслідок цього існує деяка мінімальна товщина d_c шару металу, при якій виникає перший канал провідності. Величина d_c визначається технологічними особливостями формування плівки (швидкість конденсації металу, температура підкладки, стан поверхні, режими термообробки плівки після конденсації), а також властивостями матеріалів конденсату і підкладки. Одним з ефективних методів зменшення d_c виявилось використання попереднього нанесення на діелектричну підкладку підшарів поверхнево активних речовин субатомної товщини,

які перешкоджають коагуляції конденсатів металу. Згідно перколяційної теорії [2, 3], в околі переходу від не електричносуцільної до електричносуцільної структури, опір R плівки металу можна представити універсальною функцією товщини d (якщо припустити, що $(d - d_c) \sim (x - x_c)$):

$$R \sim (d - d_c)^{-\nu},$$

де ν – показник степеня, x – параметр ступеня заповнення поверхні підкладки металом, x_c – параметр перколяції, значення ступеня заповненості поверхні підкладки, при якому кристаліти (острівці) плівки металу вперше сформують провідний канал. В рамках перколяційної моделі аналогічною функціональною залежністю можна представити статичну σ_0 , динамічну провідність σ_ω чи діелектричну постійну ϵ тонкої плівки металу. Підшари субатомної товщини поверхнево активної речовини в значній мірі визначають режим росту плівки металу, а по величині показника степеня ν можна судити про режим росту плівки металу. На даний час відома з літератури інформація про вплив підшарів поверхнево активної речовини на структуру та електричні властивості дуже тонких металевих плівок недостатня для цілеспрямованого вибору матеріалів з метою контрольованого впливу на процес перколяції.

I. Методика експерименту

В роботі досліджено особливості появи металевої провідності в свіжнанесених на поліроване скло плівок марганцю та вплив на них підшарів алюмінію субатомних товщин. Вибір марганцю об'єктом

дослідження обумовлений перспективою використання його плівок в якості резистивних елементів мікросхем (високий питомий опір r та дуже низький температурний коефіцієнт опору b)

Експеримент проведено в умовах надвисокого вакууму (тиск залишкових газів протягом препарування та дослідження плівок нижчий за 10^{-7} Па) у відпаяних скляних приладах. Досліджувались свіжнанесені на охолоджену до $T = 78$ К підкладку плівки. Шари наносили шляхом конденсації пари термічно розігрітого матеріалу. Масову товщину плівок оцінювали по зсуву резонансної частоти п'єзокварцевого вібратора, розміщеного в потоці пари металу. З більш детальним описом особливостей експериментальної методики можна ознайомитись в наших попередніх роботах [4]. Вимірювання опору плівок здійснювали електронним омметром типу Щ301-1 з допомогою двозондової методики. Фіксувались опори нижчі за 10^8 Ом. З метою запобігання утворення кристалічних зростків значних розмірів та отримання більш однорідні по товщині зразки, плівки конденсували з швидкістю не вищою (0,01 - 0,02) нм/с. Плівки алюмінію наносили на підкладку безпосередньо перед нанесенням плівки марганцю. Опір підшару алюмінію перевищував 10^8 Ом.

II. Результати експерименту та їх обговорення

Електропровідність у плівках марганцю, нанесених на підшари алюмінію, спостерігається при товщинах, значно менших, ніж це має місце у плівках, нанесених в ідентичних умовах на оплавлене поліроване скло. На рис. 1, наведено залежності питомого опору ρ від товщини d свіжнанесених на чисту поверхню скла (крива 1) та на підшар алюмінію масовою товщиною $d_c = 0,5$ нм (крива 2). Зауважимо, що отримані залежності характеризують електричносуцільні плівки металу, оскільки в діапазоні температур від 78 К (температура зрідженого азоту) до 90 К (температура зрідженого кисню) температурний коефіцієнт опору плівок $\beta > 0$.

Наведені на Рис.1. залежності питомого опору від товщини плівки $\rho = \rho(d)$ можна описати з допомогою теоретичних моделей класичного і квантового розмірних ефектів.

Використана в роботі методика препарування зразків дозволила отримувати плівки, розміри кристалітів в яких не залежать від товщини шару, що обумовлено малою поверхневою рухливістю конденсованих частинок металу при повільній їхній конденсації на охолоджену до температури зрідженого азоту поверхню підкладки [1]. Сказане підтверджує і можливість використання теорії класичного розмірного ефекту Фукса-Зондгеймера для опису розмірних залежностей питомого опору плівок марганцю товщиною більшою за 15 нм. Згідно з цією теорією в плівці, структура якої не змінюється із зміною товщини, залежність $\rho(d) \cdot d$ від товщини

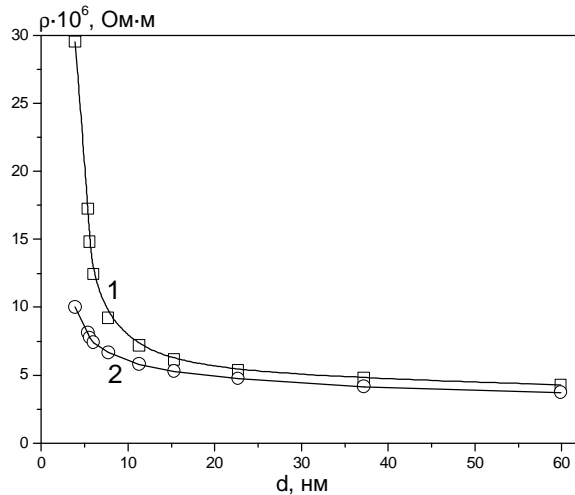


Рис. 1. Розмірні залежності питомого опору свіжнанесених плівок марганцю осаджених на чисту скляну підкладку (1) та підкладку попередньо покриту підшаром алюмінію 0,5 нм (2) при температурі зрідженого азоту. Вимір проведено при $T = 78$ К.

лінійна, а нахил прямої рівний ρ_∞ – питомому опору плівки безмежної товщини ($d \rightarrow \infty$), структура якої ідентична будові плівки різних товщин. Експериментальні розмірні залежності $\rho(d) \cdot d = f(d)$ при $d > 15$ нм лінійні.

Для врахування внеску поверхневого розсіювання в сумарний опір плівки зручно використати поняття залишкової провідності $\sigma_{res} = 1/\rho_{res} = 1/[\rho(d) - \rho_\infty]$. В межах можливості використання теорії класичного розмірного ефекту σ_{res} лінійно зростає із збільшенням d .

В плівках, товщина яких менша за 15 нм, лінійність порушується, що обумовлено внеском додаткового розсіювання носіїв за рахунок існування макроскопічних поверхневих неоднорідностей, а відповідно і існуванням неоднорідностей товщини шару. В даній ділянці товщин залежність $\rho(d)$ описується з допомогою теорії Намба [1]. Використання виразу теорії Намба для опису розмірної залежності $\rho(d)$ дозволило здійснити оцінку середньої амплітуди поверхневих макроскопічних неоднорідностей h . Для плівок нанесених на підшар алюмінію $h = 3$ нм, а для плівок нанесених на чисту поверхню скла ця величина рівна 6 нм.

В плівках, товщина яких менша за 10 нм, спостерігається вплив розмірного квантування складової квазіімпульса електронів перпендикулярної до зовнішніх поверхонь плівки і згідно з теорією квантових розмірних ефектів у металевих плівках [1] розмірна залежність $\sigma_{res}(d)$ є степеневою функцією товщини d : $\sigma_{res} \sim d^\alpha$. Згідно з теорією Фішмана і Цалецького [5] показник степеня α залежно від матеріалу може змінюватись в межах від $2,1 \leq \alpha \leq 6$ (перехід від металу до високоомного напівпровідника)

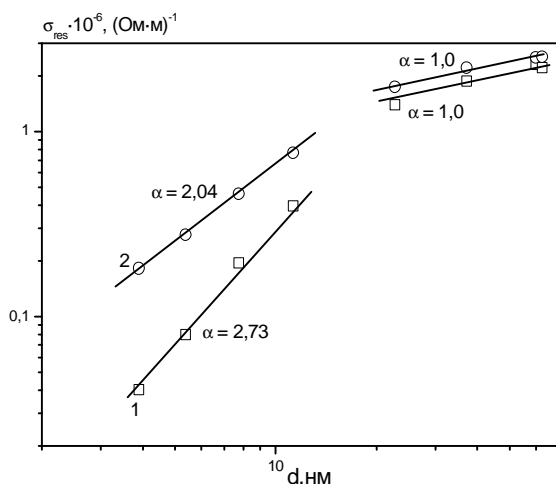


Рис. 2. Розмірні залежності залишкової провідності $\sigma_{res} = \sigma_{res}(d)$ плівок марганцю на чистому склі (1) та на підшарі Al масовою товщиною 0,5 нм (2). Точки – експериментальні дані, відрізки прямих – лінійна апроксимація.

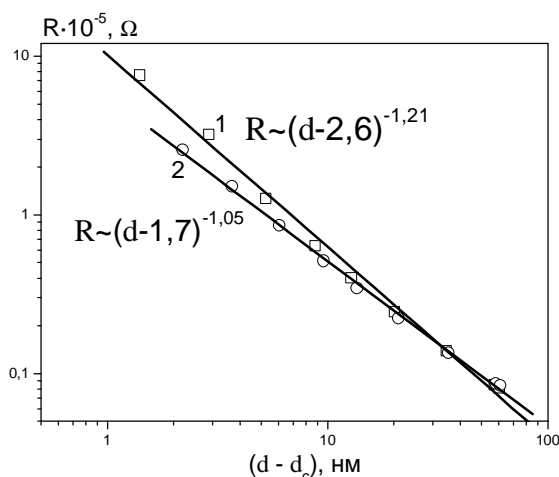


Рис. 3. Розмірні залежності опору свіжонанесених плівок марганцю осаджених на чисту скляну підкладку (крива 1) та підкладку попередньо покриту підшаром алюмінію 0,5 нм (крива 2) при температурі зрідженого азоту. Перераховані в координатах $R = R(d - d_c)$ у логарифмічному масштабі. Точки – експериментальні дані, відрізки прямих – лінійна апроксимація.

Розмірні залежності σ_{res} плівок наведено на рис. 2. З рисунка видно, що на залежності σ_{res} від товщини плівки d існують два діапазони, що ліанеризуються в логарифмічному масштабі. Підшар алюмінію прискорює металізацію плівки марганцю і тому в області малих товщин провідність плівки марганцю, нанесеної на підшар алюмінію суттєво більша за провідність плівки марганцю, нанесеної на чисту поверхню полірованого скла.

В рамках перколяційної моделі можна оцінити мінімальну товщину при якій між кристалітами плівки виникає перший канал провідності. В [6] показано, що з розмірних залежностей опору плівок металів, апроксимованих залежністю $R \sim (d - d_c)^{-\nu}$, показник ν може змінюватись в межах від 1 до 1,6 і

виявлено, що його значення залежить лише від механізму росту плівки та її структури. Збільшення значення показника степеня свідчить про перехід від 2D (пошаровий ріст плівки металу на поверхні підкладки) до переважаючого 3D (ріст коагульованих зародків кристалізації плівки металу на поверхні підкладки) механізму формування плівки, що свідчить про перехід до домінуючого впливу об'єму зразка металу. На рис. 3 наведено розмірні залежності опору плівки марганцю осадженої на скляну поверхню (крива 1) та поверхню попередньо покриту шаром алюмінію (крива 2).

Експериментальні дані апроксимовані виразом перколяційної теорії $R \sim (d - d_c)^{-\nu}$. На відповідних кривих, спостерігається зменшення перколяційної товщини d_c від 2,6 нм до 1,7 нм та показника степеня від 1,21 до 1,05. Отримані результати в рамках перколяційної теорії свідчать про переважаючий 2D режим росту плівки. Підкладка покрита підшаром алюмінію в порівнянні з чистою підкладкою послаблює процес коагуляції, тим самим зменшує середню амплітуду поверхневих неоднорідностей і сприяє переважаючому 2D режиму росту плівки марганцю.

Детальний аналіз результатів досліджень електропровідності плівок марганцю, осаджених на підшари алюмінію дозволяє зробити наступні висновки:

Висновки

1. В результаті дослідження розмірних залежностей питомого опору свіжонанесених на охолоджену до 78 К скляну підкладку встановлено, що попередньо нанесений на підкладку підшар алюмінію субатомної товщини сприяє прискоренню металізації плівки марганцю.

2. Отримані розмірні залежності питомого опору ρ та залишкової провідності σ_{res} можна описати з допомогою теорій класичного та квантового розмірних ефектів.

3. Визначено перколяційні товщини плівок марганцю, нанесених на поліроване скло та підшар алюмінію при 78 К і встановлено існування 2D режиму росту плівки марганцю.

Бучковська М.Д. – інженер II- категорії кафедри фізичної та біомедичної електроніки, факультету, електроніки;

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

Бігун Р.І. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізичної та біомедичної електроніки, факультету Електроніки;

Пенюк Б.Р. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізичної та біомедичної електроніки факультету електроніки;

Пастирський Я.А. – старший викладач кафедри фізичної та біомедичної електроніки факультету електроніки.

- [1] А.П. Шпак., Р.І. Бігун., З.В. Стасюк., Ю.А. Куницький. Структура та електропровідність ультратонких плівок міді, золота та срібла. // *Наносистеми, наноматеріали та нанотехнології*. **8**(2), сс. 1001-1050 (2010).
- [2] M. Walther, D. Cooke, C. Sherstan, M. Hajar, M. Freeman, F. Hegmann. Terahertz conductivity of thin gold films at the metal-insulator percolation transition // *Phys. Rev. B*. **76**, 125408(1-9) (2007).
- [3] A. Kubovy. A percolation model of the conduction threshold in thick film resistors: Segregated structures // *J.Phys. D: Appl. Phys.* **19**, pp. 2171-2183 (1986).
- [4] Р. І. Бігун, З.В. Стасюк. М. Ю. Барабаш., Ю. А. Куницький. Влияние поверхности на перенос заряда в тонких металлических пленках на основе непереходных металлов. // *Хімія, фізика та технологія поверхні*. **1**(2) сс. 1-10 (2010).
- [5] G. Fishman., D. Calecki. Influence of surface roughness on the conductivity of metallic and semiconducting quasi-two-dimensional structures // *Phys. Rev. B*. **43**,(14) pp. 11581–11585 (1991).
- [6] J.A.J. Lourens, S. Arajs, H.F. Helbig, L. Cheriet, and El-Sayed, A. Mehanna. The electrical. Resistance of Cr films // *J.Appl. Phys.* **63**(8), pp. 4282-4284 (1988).

M.D. Buchkovska, R.I. Bihun, Z.V. Stasyuk, B.R. Penyukh, Ya.A. Pastyrsky

Percolation Process in Electron Transport Properties of Manganese Films

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

The electrical properties of quench condensed ultrathin manganese films were investigated. Predeposited aluminum underlayers accelerate metallization process in manganese films. The main models of classical and quantum electron transport in metal films were used in explanation of resistivity size dependences. Metal electron transport character was explained in the framework percolation theory. Aluminum underlayer helps manganese film 2D formation.