

PACS numbers: 68.35.Np, 68.37.Hk, 68.55.-a, 68.60.Bs, 73.30.+y, 73.61.At, 81.15.-z

Модифікація тонких металевих плівок Ag, Cu, Ni під дією атомарного водню

Є. Л. Жавжаров

*Запорізький національний технічний університет,
вул. Жуковського, 63,
69002 Запоріжжя, Україна*

Досліджено вплив атомарного водню на параметри тонких металевих плівок Ag, Cu, Ni (15–200 нм), нанесених термічним випаровуванням на діелектричні підложжя. Оброблення виконувалося за температур 300–310 К, тиску ~ 20 Па і концентрації атомарного водню 10^{17} – 10^{19} м⁻³. Виявлено і досліджено кінетику зміни морфології поверхні, роботи виходу та електропровідності тонких металевих плівок. Представлено фізичне обґрунтування спостережуваних явищам, визначено фактори, що впливають на характер та кінетику зміни електрофізичних параметрів тонких плівок.

An influence of the atomic hydrogen on the thin films of Ag, Cu, Ni (of 15–200 nm thickness) deposited by thermal evaporation in vacuum on dielectric substrates is studied. Experiments are carried out at temperatures of 300–310 K, pressure of about 20 Pa, and the atomic hydrogen concentrations of 10^{17} – 10^{19} m⁻³. Kinetics of surface morphology change, work function and conductivity of thin metallic films are revealed and investigated. The mechanism explaining the results obtained is proposed. Factors, which influence on character and kinetics of change of electrophysical parameters of thin films, are revealed.

Исследовано воздействие атомарного водорода на параметры тонких металлических пленок Ag, Cu, Ni (15–200 нм), нанесенных термическим испарением на диэлектрик. Обработка проводилась при температуре 300–310 К, давлении ~ 20 Па и концентрации атомарного водорода 10^{17} – 10^{19} м⁻³. Выявлены и исследованы кинетика изменения морфологии поверхности, работы выхода и электропроводимости тонких металлических пленок. Предложен физический механизм, объясняющий результаты исследования. Выявлены факторы, влияющие на характер и кинетику изменения электрофизических параметров тонких пленок.

Ключові слова: тонкі металеві плівки, атомарний водень, морфологія, електропровідність, робота виходу.

(Отримано 26 серпня 2010 г.)

1. ВСТУП

Сучасний розвиток науки та техніки нерозривно пов'язаний із створенням та використанням матеріалів з новими властивостями. Вирішення цього питання можливе як за рахунок синтезу принципово нових матеріалів, так і шляхом розвитку технологій виготовлення та модифікації матеріалів. Особливу наукову та прикладну увагу привертають тонкі плівки та поверхневі шари, які за властивостями є проміжними між наноматеріалами та об'ємним тілом.

Одержання тонких плівок на поверхні твердого тіла із заданими електрофізичними властивостями часто пов'язано із дією багатостадійних процесів, високої температури [1] або частинок високих енергій [2]. Альтернативним способом зміни електрофізичних параметрів тонких плівок може слугувати їх оброблення атомарним воднем. При рекомбінації атомів гідрогену в молекулі на поверхні твердих тіл виділяється енергія близько 4,48 eV на один акт рекомбінації [3], яка може бути передана кристалічній ґратниці або електронній підсистемі твердого тіла.

Відомий на сьогодні вплив атомарного гідрогену на електрофізичні властивості твердого тіла можливо розглядати у двох аспектах: безпосередньо дія водню (молекулярного чи атомарного) при його адсорбції та розчиненні; дія ефектів, стимульованих рекомбінацією атомарного водню на поверхні твердого тіла.

Дія молекулярного водню на тверде тіло у більшості випадків розглянута для масивних зразків [4], а характер дії суттєво залежить від концентрації гідрогену [5].

Дисипація енергії рекомбінації може призводити до появи ряду ефектів, таких як радикалорекомбінаційна люмінесценція [6], емісія [7], розігрів [8], розпорошення [9] чи гетеродифузія [10]. В роботах [10–14] вивчався процес радикалорекомбінаційної дифузії атомів Cu, Ag, Ni, Au, In в Ge з тонких плівок, нанесених на підкладку. Автором була запропонований узагальнений модель процесу дифузії атомів металів з плівки у приповерхневі шари підкладки, згідно якої протягом оброблення структур з плівкою, плівка змінює свій стан і проходить наступні стадії: суцільна плівка, плівка з розривами, острівцева плівка, відсутність плівки. Звідси випливає можливість модифікації електрофізичних властивостей тонких плівок та межі поділу плівка–підложжя у досить широких межах. Однак відомості про зміни електрофізичних параметрів тонких металевих плівок під час такої взаємодії на сьогодні обмежені. Дана робота присвячена встановленню основних закономірностей впливу атомарного водню на електрофізичні параметри тонких металевих

плівок і структур на їх основі з метою прогнозування дії атомарного водню на їх основні параметри.

2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

У якості матеріалу для тонких металевих плівок обрано Cu, Ag, Ni, що обумовлено їх широким застосуванням, у тому числі у виробках електроніки, а також тим фактом, що саме на плівках з цих металів була зафіксована зміна стану плівок під дією H [12–14].

Оброблення зразків виконувалося у камері, яка являє собою проточну систему з двох кварцових трубок різного діаметра. Молекулярний водень, одержаний електролізером, після фільтрації поступав у робочу камеру. У трубці малого діаметра запалювалася ВЧ плазма, де водень дисоціював на атомарний. Зразки розміщувались у кварцовій трубці більшого діаметра на спеціально виготовленому утримувачі зразків, в який було вмонтовано давач температури. Дані про температуру та електроопір зразків автоматично реєструвалися на ЕОМ.

Досліджувалися тонкі плівки Ag, Cu, Ni товщиною 20–200 нм, одержані термічним випаровуванням у вакуумі $5 \cdot 10^{-3}$ Па, при температурі підкладки, що не перевищує 50°C . В якості підкладки використовувався ситал СТ-50-1 з шорсткістю поверхні $Rz < 0,032$ мкм. Товщина плівок під час напорошення контролювалася методом кварцового мікрозважування [15].

Дослідження електроопору тонких плівок виконувалося на спеціально створених зразках прямокутної форми 5×60 мм, по краях яких розташовувалися контактні ділянки (металева плівка 1–2 мкм). До контактних майданчиків прилютовувалися виводи, після чого за допомогою компаунда ці місця захищалися від дії атомарного водню. Оброблення зразків у середовищі атомарного водню виконувалося в камері за кімнатних температур.

Атомарний водень утворювався при дисоціації молекулярного водню в плазмі високочастотного розряду. Молекулярний водень одержували з водного розчину КОН (20%) шляхом електролізу при малій щільності струму ($j < 20$ мА/см²). Далі водень пропускався через форбальон для уловлювання парів КОН, осушну колонку, заповнену гранульованим силікагелем, і поступав у робочу камеру. Концентрація атомарного водню вимірювалася кальориметричним способом [16].

Для дослідження зміни поверхневого потенціалу зразків під впливом атомарного водню використовувалася метода динамічного конденсатора [17]. Етальонна електрода устави була виготовлена із золота (робота виходу $WF_{\text{Au}} = 4,3$ еВ). Безпосередні виміри контактної різниці потенціалів давали значення різниці робіт виходу етальону WF_{Au} і зразка $WF_{\text{зр}}$:

$$\Delta WF = WF_{\text{Au}} - WF_{\text{зр}}.$$

Точність виміру контактної різниці потенціалів (КРП) складала ± 10 мВ. Виміри КРП виконувалися перед обробленням у середовищі атомарного водню, безпосередньо після оброблення, а також після витримки зразків за кімнатних умов протягом певного часу.

Дослідження морфології поверхні зразків виконувалося за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106И фірми Selmi. Структура тонких плівок досліджувалася за допомогою просвітнього мікроскопа УЕМВ-100К.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Експериментальні дослідження [18–20] показали, що вплив атомарного водню (Н) на електрофізичні властивості тонких металевих плівок слід розглядати залежно від таких чинників як концентрація атомарного водню, час взаємодії, та властивостей вихідної плівки, насамперед її товщини.

Експериментально встановлено, що на початковому етапі взаємодії активно протікають процеси фізичної та хемічної адсорбції. Результатом такої дії є зміна поверхневого потенціалу. При концентраціях $\sim 10^{17} \text{ м}^{-3}$ відбувається нелінійне зростання потенціалу поверхні з часом оброблення для плівок Ag, Ni (рис. 1).

Оброблення металевих плівок в Н супроводжувалося поступовим розігрівом зразків на ΔT до 60 К. Розсіяння енергії викликає розігрів, температура зразків у рівноважному стані (коли кількість теплоти, що виділяється при рекомбінації, дорівнює кількості теплоти, яка відводиться) визначається тиском у камері, концентрацією Н, теплопровідністю підкладок. Взаємодія атомарного водню з плівками міді відрізняється від взаємодії з плівками Ag, Ni наявністю екстремуму на залежності $\Delta WF = f(t)$ (рис. 2).

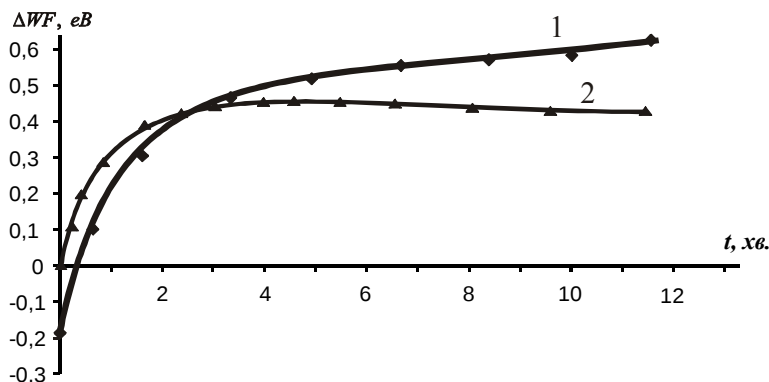


Рис. 1. Зміна КРП поверхні металевої плівки (~ 50 нм) під дією Н, $C_H \approx 10^{17} \text{ м}^{-3}$: 1 — плівка Ni; 2 — плівка Ag.

Взаємодію атомарного водню із плівками Cu можна розділити на два етапи [20]. На I етапі взаємодії різка зміна потенціалу поверхні та зміна кольору поверхні плівок Cu вірогідно відбувається за рахунок утворення гідриду міді CuH_x — речовини червоно-коричневого відтінку, яка, згідно з [21], розкладається за температури 330–340 К. При подальшому обробленні внаслідок дисипації енергії рекомбінації атомарного Н в молекулярний за реакцією $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + 4,48 \text{ eV}$ відбувається, по-перше, розігрів зразків, а по-друге, розпорошення плівки. Подальше оброблення плівок міді під дією цих двох процесів призводить до зменшення потенціалу поверхні, яке відбувається внаслідок зникнення гідриду міді і відновлення чистої поверхні.

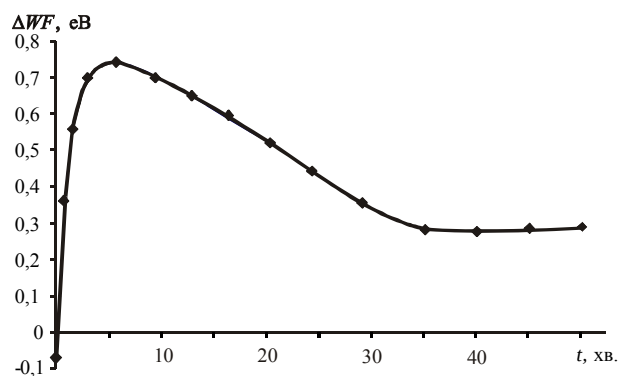


Рис. 2. Зміна КРП поверхні плівки Cu ($\sim 200 \text{ нм}$), $C_{\text{H}} \approx 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

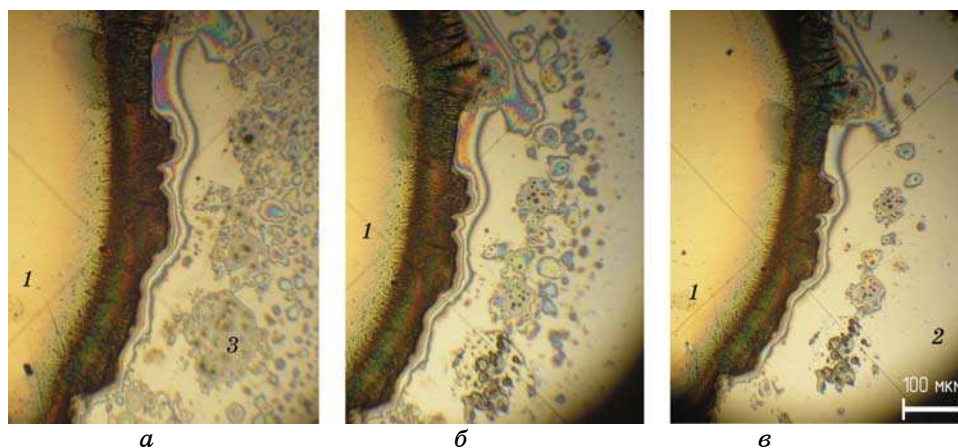


Рис. 3. Поверхня межі плівка Ni-Si: а — початковий стан; б — після 5 хв. оброблення в Н, $C_{\text{H}} \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$; в — після 15 хв. оброблення в Н, $C_{\text{H}} \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (1 — суцільна плівка Ni; 2 — поверхня Si-підложжя; 3 — острівцева плівка Ni).

Характер зміни КРП при обробленні плівок за концентрацій $N \geq 10^{18} \text{ м}^{-3}$ для всіх трьох дослідних металів майже не відрізняється від залежності на рис. 1. Це пояснюється домінуючою дією процесів, стимульованих розсіянням енергії рекомбінації — розпорошенням та поверхневою дифузією.

Локальне виділення теплоти хемічної реакції рекомбінації є рушійним чинником структурних змін тонких металевих плівок. Встановлено, що за структурні зміни відповідають такі процеси як: масоперенесення атомів плівки, що може призводити до процесу рекристалізації або кристалізації плівки, процес розпорошення та процес утворення дефектів структури.

Процес розпорошення супроводжує взаємодію атомарного водню з поверхнею вже з початку такої взаємодії (рис. 3).

Вже на початкових етапах оброблення плівок атомарним гідрогеном призводить до релаксації внутрішніх напружень та ініціює процеси кристалізації. Про це свідчить зменшення ступеня розмитості рефлексів електроннограми обробленої плівки у порівнянні з контрольними зразками (рис. 4). Таким чином, контакт тонких металевих плівок з атомарним воднем супроводжується процесами адсорбції водню, очищення поверхні, відновлення окислів металу, розігріву зразків та розпорошення плівки.

Експериментально встановлено, що характер впливу атомарного водню на структуру тонких металевих плівок суттєво залежить від товщини плівок та концентрації Н. Експериментально виділено критичну товщину плівки, яка складає для Ag, Cu величину $\sim 30 \text{ нм}$ та $\sim 20 \text{ нм}$ для плівок Ni.

Виявлено, що домінуючий внесок у зміну морфології поверхні плівок різної товщини спричиняють різні фізичні процеси. А саме, для плівок з товщиною менше критичної — домінуючими процесами зміни морфології поверхні є процеси розпорошення та коалесценції плівок. Наслідком такої дії є перетворення плівки на несущільну і поступове зникнення плівки з поверхні підкладки. Для плівок з товщиною більше критичної домінуючим механізмом зміни морфології поверхні можна вважати масоперенесення, яке стимулює два процеси — поверхневу дифузію та процес розпорошення. Встановлено, що домінуючий механізм зміни морфології поверхні залежить від властивостей вихідної плівки. Так, для дрібнозернистих плівок срібла товщиною як більшою, так і меншою критичної на початковому етапі взаємодії (та концентраціях Н не більше 10^{18} м^{-3}) домінуючим процесом є зростання зерен за рахунок масоперенесення в плівці. Однак оброблення плівок супроводжується одночасним зменшенням ефективною товщини плівки, про що свідчать результати аналізу хемічного складу у приповерхневих шарах. Це пов'язано із процесами ущільнення та розпорошення плівки. Відмітимо, що швидкість зростання зерен, протікання процесів ущільнення та розпорошення за однакових умов

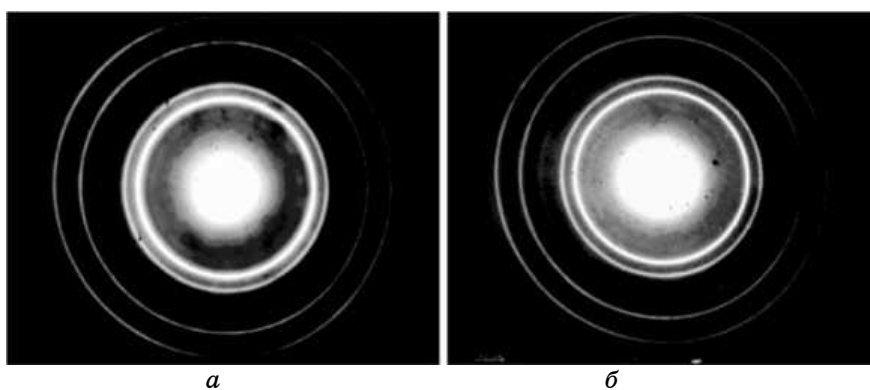


Рис. 4. Електронограми (мікродифракція) плівки Ni (~ 20 нм): *a* — контрольна плівка; *б* — після оброблення Н 30 хв., $C_H \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

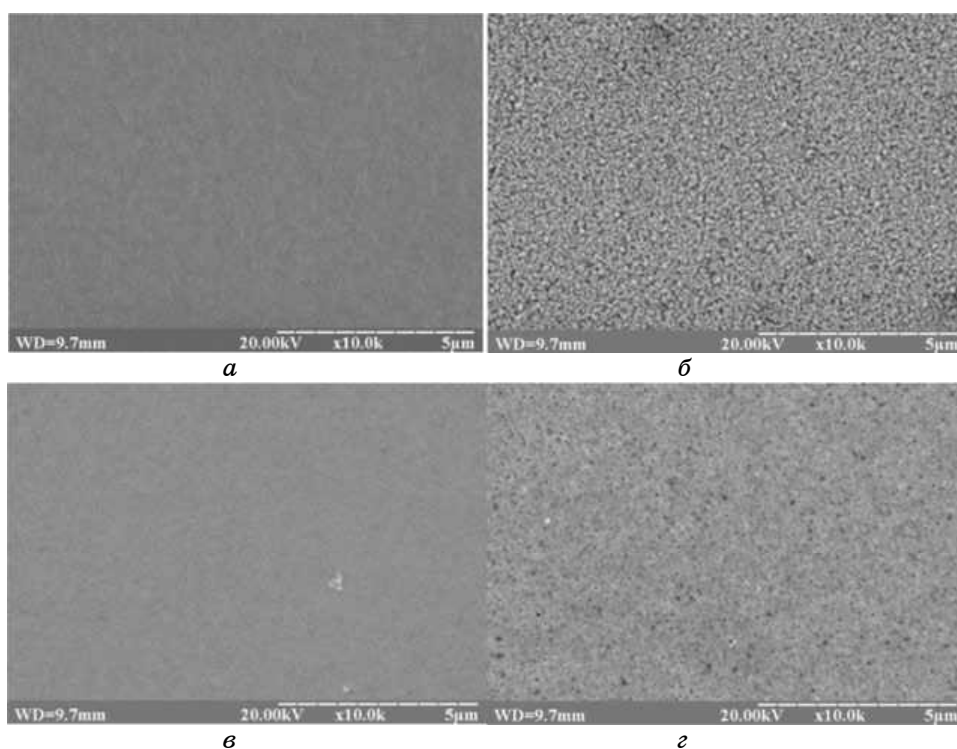


Рис. 5. Зміна морфології плівки Ag під дією Н: *a* — контрольна плівка Ag (~ 15 нм); *б* — Ag (~ 15 нм) після 5 хв. оброблення Н, $C_H \approx 10^{17} \text{ м}^{-3}$; *в* — контрольна плівка Ag (~ 80 нм); *г* — Ag (~ 80 нм) після 5 хв. оброблення Н, $C_H \approx 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

оброблення більш інтенсивно протікає на тонших плівках (рис. 5).

Для неоднорідних плівок, де у структурі вихідної плівки можна виділити зерна різних розмірів при більших дозах оброблення, тобто часу оброблення та концентрації, може відбуватися ефект «полірування» — поступове зменшення розміру дрібних зерен плівки, і більш інтенсивне зменшення розміру великих зерен (рис. 6).

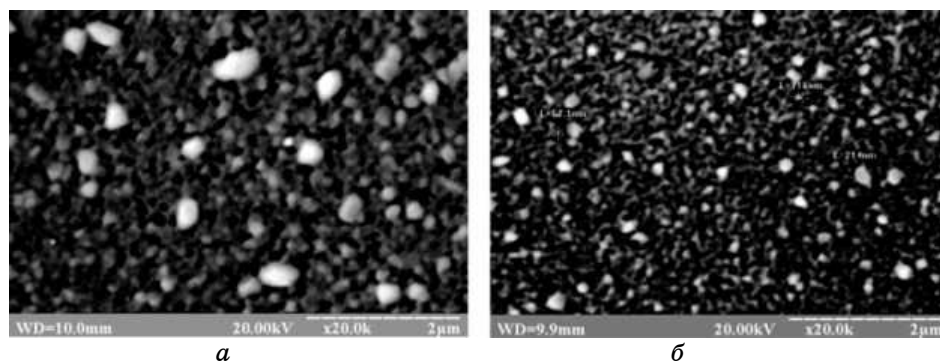


Рис. 6. Зміна морфології поверхні плівки Ag (~15 нм), під дією Н, $C_H \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$: *a* — контрольна плівка; *б* — після оброблення 15 хв. Н.

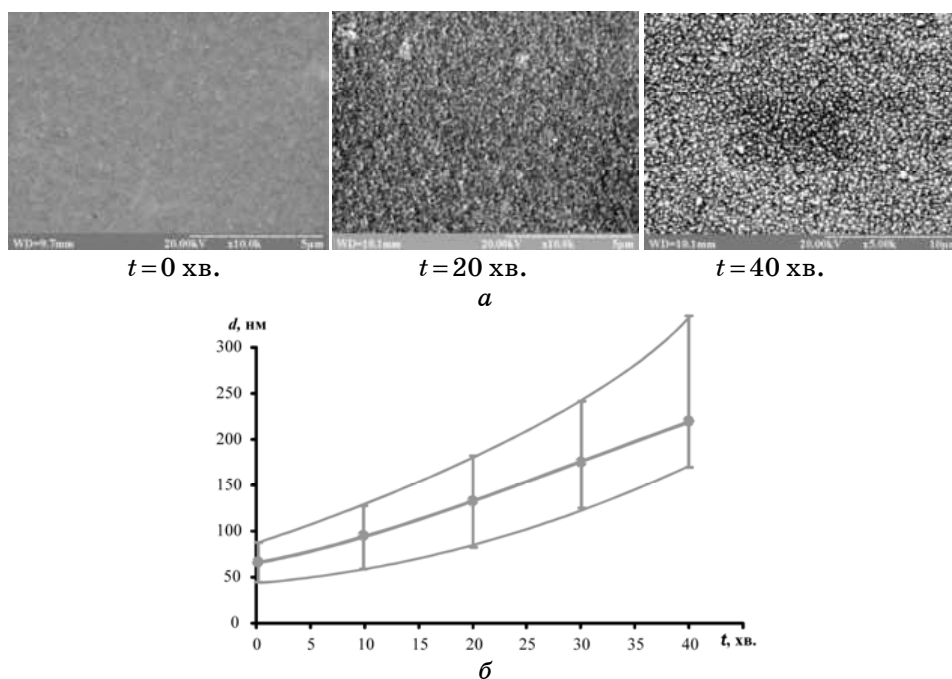


Рис. 7. Зміна морфології поверхні (*a*) та розміру зерна плівки Cu (~200 нм) від часу оброблення t атомарним воднем (*б*) при $C_H \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Для плівок товщиною більшою за критичну при $C_H \geq 10^{19} \text{ м}^{-3}$ домінуючими процесами є зростання розміру зерен під дією процесу масоперенесення атомів плівки та зрощення окремих зерен (рис. 7). Оціночне значення середньої швидкості зростання зерна складає близько 4 нм/хв. як для Cu, так і для Ag.

Внеском процесу розпорошення на зміну морфології таких плівок можна знехтувати до моменту досягнення критичної товщини плівки, після якого починає вносити суттєвий внесок процес коалесценції. Аналогічні процеси експериментально зафіксовані і на плівках міді. Таким чином відкривається можливість для полікристалічних плівок їх рекристалізації при температурах підкладки близьких до кімнатних, а для аморфних — їх кристалізації.

Взаємодія атомарного водню з плівками різних металів має особливості, пов'язані з їх фізико-хімічними властивостями. За великих доз оброблення ($t > 20 \text{ хв.}$, $C_H > 10^{18} \text{ м}^{-3}$) для плівок товщиною більшою критичної і за умови розміщення плівки на підкладках з малою газопроникністю, наприклад СТ-50-1, можливо утворення бульбашок на поверхні плівки (рис. 8).

Фізичний механізм утворення бульбашок (рис. 9) можливо пов'язати з наступним. На початковому етапі взаємодії відбувається розчинення та накопичення водню в порах та межі поділу плівка–підкладка. При подальшому обробленні внаслідок зрощення зерен та ущільнення плівки відбувається поява бульбашок.

Зміни у структурі плівки супроводжуються змінами електропро-

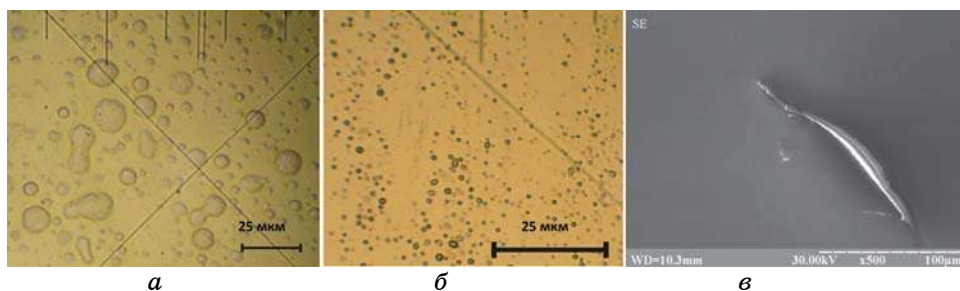


Рис. 8. Утворення бульбашок на плівках Ag (а), Cu (б), Ni (в) під дією Н.

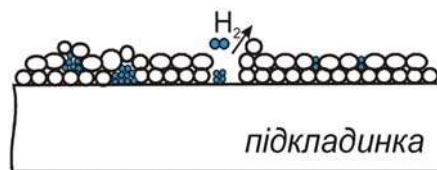


Рис. 9. Механізм виникнення бульбашок на металевих плівках під дією Н.

відності. При дослідженні впливу атомарного водню на електроопір тонких металевих плівок була виявлена нелінійна залежність опору плівок від часу оброблення t . Найбільш повною за проявом та цікавою для розгляду можна вважати залежність опору плівок Ni (рис. 10).

На залежності спостерігаються три яскраво виражені ділянки та два екстремуми, що свідчать про наявність конкуруючих за своїм впливом на електроопір механізмів взаємодії атомарного водню із твердим тілом. Як показали експерименти [20], ці процеси залежать: від концентрації атомарного водню, оскільки при менших концентраціях Н третя ділянка не спостерігається; та товщини плівок, із збільшенням товщини плівок ефективні зміни опору — зменшуються (рис. 11). Це підтверджує одержану при дослідженні морфології поверхні залежність швидкості перебігу процесів від товщини плівки. Аналіза експериментальних даних, одержаних за різних умов, дозволила встановити, що найбільший внесок у зміну електроопору на I етапі вносять такі процеси як розігрів поверхні та

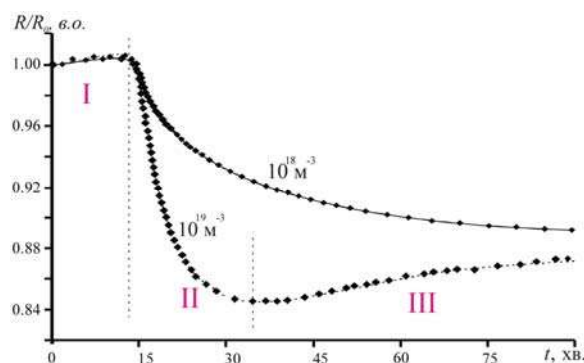


Рис. 10. Зміна електроопору плівки Ni (~50 нм) від часу оброблення Н.

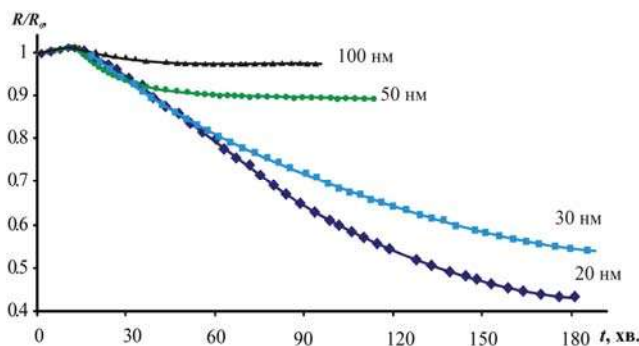


Рис. 11. Зміна електроопору плівок Ni різної товщини, $C_H \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

процес розпорошення плівок. Розігрів зразків залежить від концентрації Н та коефіцієнтів акомодатії і рекомбінації.

На II етапі процеси, що призводили до збільшення електроопору, нівелюються внеском інших процесів. Такими процесами є ущільнення плівок та рекристалізація. В загальному випадку опір дрібнокристалічних тонких плівок складається з опору кристалітів металу, опору міжкристалічних прошарків, і опорів обумовлених розсіюванням на межах зерен та межах плівки. Процес зростання та зрощення зерен при рекристалізації спричинятиме зменшенню кількості меж зерен та міжзеренних прошарків.

Аналогічні процеси відбуваються при відпалі плівок. Порівняння процесу відпалу плівки за 400 К із процесом оброблення Н при $C_H \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$ вказує, що оброблення Н є більш ефективним [20]. На III етапі домінуючими процесами є процес розпорошення та утворення дефектів структури.

Взаємодія Н з плівками міді та срібла має подібний характер, однак є певні відмінності (рис. 12).

Для плівок міді хоча і спостерігається всі три ділянки, 1 ділянка дуже коротка, а зміни відбуваються при менших концентраціях Н; для плівок срібла характерна відсутність I етапу зміни електроопору. Ці відмінності пов'язані, по-перше, з різним характером взаємодії матеріалів цих плівок із воднем, по-друге, — різними властивостями матеріалу, що обумовлює різну швидкість масоперенесення.

На кінетику перебігу під дією Н процесів суттєво впливають умови взаємодії. Так, за інших умов оброблення (менші товщини, чи більша концентрація) домінуючим процесом є процес розпорошення плівки, що призводить до збільшення електроопору (рис. 13, а).

Фізичний механізм, що відповідає за різке збільшення електроопору плівок, — поява розривів і перехід плівки у острівцеві.

Модифікація структури та електричного опору відображається на зміні властивостей межі плівка–підкладка. Вплив водню на властивості гетероструктур досліджувався на структурах Cu–Si. Одержані експериментальні дані свідчать, що оброблення зразків призводить до збільшення когезії та адгезії плівки до кремнієвих підкладок більш ніж у 6 разів (рис. 14).

Домінуючим процесом відповідальним за це є ущільнення плівки та перерозподіл атомів на межі поділу плівка–підкладка (рис. 15), про що свідчать результати дослідження елементного складу за глибиною виконаних на Оже-спектрометрі.

4. ВИСНОВКИ

Взаємодія Н з металевими плівками Ni, Cu, Ag (10–100 нм) супроводжується комплексом одночасного перебігу процесів. Поверхня тонкої металевої плівки при такій взаємодії виступає у якості ката-

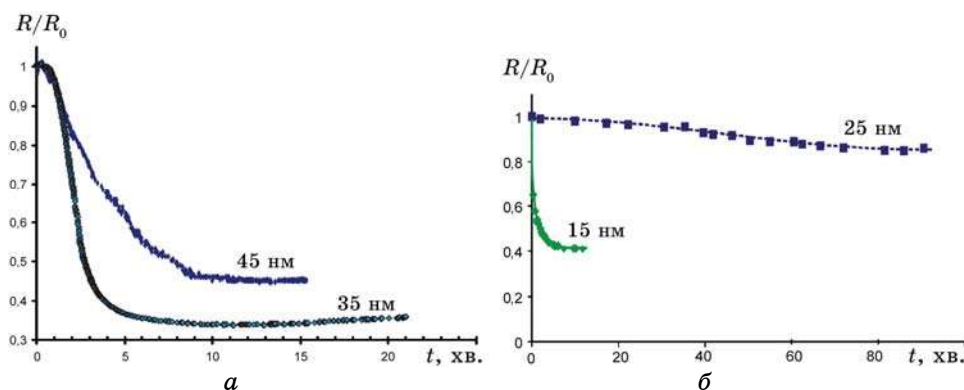


Рис. 12. Зміна електроопору плівок Cu, Ag під дією H: *a* — зміна опору Cu від часу оброблення H, $C_H \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$; *б* — зміна опору Ag від часу оброблення H, $C_H \approx 10^{17} \text{ м}^{-3}$.

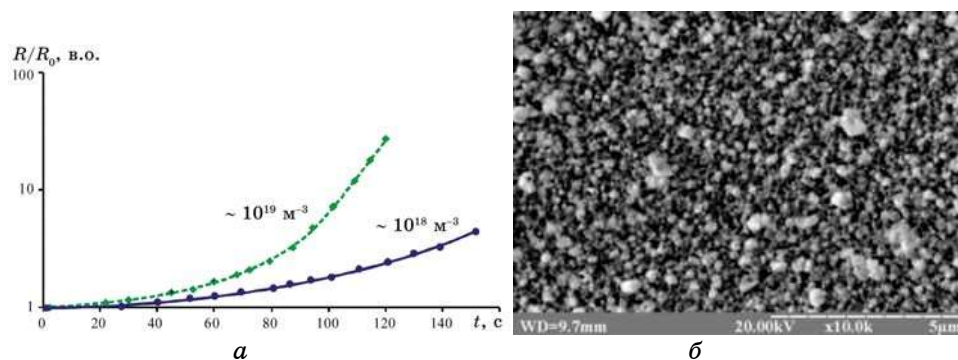


Рис. 13. Зміна електроопору плівки Cu ($\sim 25 \text{ нм}$) під дією H (*a*) та морфологія поверхні плівки Cu ($\sim 25 \text{ нм}$) після 7 хв. оброблення, $C_H \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (*б*).

лізатора для екзотермічної реакції рекомбінації атомарного водню в молекулярний. Тому до процесів адсорбції, десорбції, розчинення водню в об'ємі твердого тіла додаються ще процеси стимульовані локальним виділенням енергії рекомбінації, а саме розігрів зразків, розпорошення поверхневих шарів, ущільнення плівки, кристалізація чи рекристалізація плівки, поверхнева дифузія.

Характер впливу атомарного водню на електрофізичні властивості тонких металевих плівок Ag, Cu, Ni має багато спільного, однак відрізняється, що обумовлено різними фізико-хімічними властивостями металів: можливість утворення гідридів за умов взаємодії, різна енергія зв'язку атомів металів обумовлює різну дифузійну здатність за однакових умов.

Кінетика перебігу під дією H фізико-хімічних процесів залежить

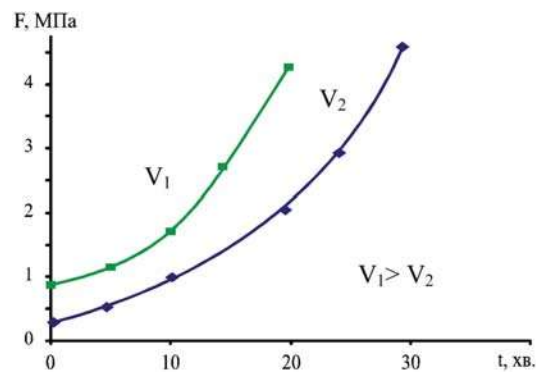


Рис. 14. Зміна адгезії Cu (~ 50 нм) при різних швидкостях осадження від часу оброблення Н, $C_H \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

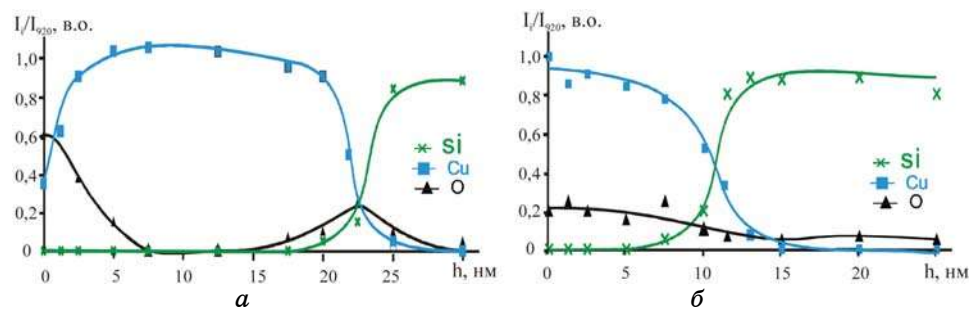


Рис. 15. Розподіл елементів за глибиною гетероструктури Cu-Si: *a* — контрольний зразок; *б* — після оброблення Н 15 хв., $C_H \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

від характеристик і властивостей вихідної плівки та підкладки, концентрації Н, тиску у камері. Так, кінетика процесів розпорошення і зміни морфології поверхні під дією Н збільшується із зменшенням товщини плівки і температури топлення металу плівки. При $C_H \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$ оціночне значення швидкості розпорошення для плівок ~ 25 нм: Ni $\sim 10^{-4}$ нм/с, Cu $\sim 0,2$ нм/с, Ag $\sim 0,5$ нм/с. Для плівок Cu (~ 210 нм) $\sim 0,01$ нм/с.

Характер змін електропровідності тонких металевих плівок під дією Н залежить перш за все від концентрації Н та товщини плівки: для плівок товщиною більше критичної $d_{\text{кр}} \sim 30$ і ~ 20 нм для Cu, Ag і Ni відповідно можливе збільшення електропровідності більш ніж у 2 рази за $C_H \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Особливість взаємодії атомарного водню з плівками Ag, Ni виявляється за великих доз оброблення у виникненні дефектів структури: міжкристалічних тріщин, відшарування плівки, появи бульбашок. Встановлено, що необхідними умовами для цього є три-

валий час оброблення, розміщення плівки на непрозорій для водню підкладці, товщина плівки більша за критичну, концентрація більша 10^{19} м^{-3} .

Одержані результати відкривають можливості для розроблення нових енергозберігаючих технологій низькотемпературної керованої модифікації властивостей тонких металевих плівок та гетероструктур на їх основі.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. М. Чапланов, М. И. Маркевич, *Неорганические материалы*, **39**, № 3: 322 (2003).
2. Chang Mei, Chen Ling, Liao Marvin, Littau Karl A, Smith David C, Chern Chyi, Tseng Jennifer, *Plasma annealing of substrates to improve adhesion*, Пат. 9936955 США, МПКМПК {6} H01L21/3205 Applied Materials Inc (US). — No. 08/498990; заявл. 28.02.97; опубл. 22.02.99.
3. К. Хауффе, *Реакции в твердых телах и на их поверхности* (Москва: Иностранная литература: 1962).
4. *Водород в металлах* (Ред. Г. Алефельд, И. Фелькль) (Москва: Мир: 1978), т. 1.
5. Y. Fukai, *The Metal Hydrogen System: Basic Bulk Properties* (Berlin–Heidelberg: Springer Verlag: 2005).
6. А. Н. Горбань, В. А. Соколов, *Оптика и спектр.*, № 7: 815 (1956).
7. В. В. Стыров, *Письма в ЖЭТФ*, **15**, вып. 5: 242 (1972).
8. B. J. Wood, J. S. Mills, and H. Wise, *J. Phys. Chem.*, **67**, No. 67: 1462 (1963).
9. А. Н. Титов, В. П. Пинчук, А. Н. Горбань, *Материалы Всесоюзного совещания по хемилюминесценции* (Запорожье: ЗМИ: 1976), с. 174.
10. В. М. Матюшин, В. И. Лищенко, А. Н. Горбань, *Украинский физический журнал*, **32**, № 9: 1407 (1987).
11. В. М. Матюшин, *Журнал технической физики*, **69**, вып. 7: 73 (1999).
12. В. М. Матюшин, *Поверхность*, № 6: 59 (2000).
13. В. М. Матюшин, *Физика и техника полупроводников*, **35**, вып. 3: 301 (2001).
14. В. М. Матюшин, И. В. Бондарев, Д. М. Белоус, *Физика и химия обработки материалов*, № 3: 72 (2000).
15. *Пленочная электроника* (Ред. Л. Холлэнд) (Москва: Мир: 1968).
16. Г. А. Дзюбенко, В. А. Лавренко, А. Н. Непочатов, *Журнал физической химии*, **39**, вып. 10: 2622 (1965).
17. Д. Вудраф, Т. Делчар, *Современные методы исследования поверхности* (Москва: Мир: 1989).
18. Є. Л. Жавжаров, Н. А. Антонченко, В. М. Матюшин, *Вісник Львів. ун-ту. Серія фізична*, вип. 42: 39 (2008).
19. Е. Л. Жавжаров, Г. А. Бялик, В. М. Матюшин, *Письма в журнал технической физики*, **33**, вып. 13: 64 (2007).
20. Є. Л. Жавжаров, *Модифікація структури та електрофізичних параметрів тонких металевих плівок і гетероструктур на їх основі під дією атомарного водню* (Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук) (Запоріжжя: ЗНТУ: 2009).
21. *Свойства элементов: Справочник в 2-х т.* (Москва: Металлургия: 1976), т. 2.