

Д. В. Гаврилюк¹, М. М. Мельниченко¹, Я. О. Жук^{1,2}

**НАНОРОЗМІРНІ ПЛІВКИ: ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ
ТА МЕТОДИКИ НАНОІНДЕНТУВАННЯ**

¹Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,
просп. акад. Глушкова, 4г, 03127, Київ, Україна; e-mail: y.zhuk@i.ua;
²Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАНУ,
вул. П.Нестерова, 3, 03057, Київ, Україна

Abstract. In the work, with the help of the micro-nano modifier "Micro-nano mod", the morphology of the surface of the gold film on mica after thermal annealing was studied. It is shown that the structural elements of nanofilm are single crystals of space orientation (111). The surface morphology of nanosized films of indium and gold on glass obtained by magnetron sputtering demonstrates a pronounced fine-grain structure. The actual depth of the indentation of a nanosized indium film can be determined after accounting for the pile-ups and the relaxational changes in the indentation over time were demonstrated. It is established that after indentation of gold nanofilms the imprint may disappear over time, as a result of nanoparticles deformation and mutual absorption. The fundamental possibility of creating nano-objects as the nanotracks-wires by means of the tunnel current on the surface of indium nanofilm is shown.

Key words: nanosized films, nanoobjects, surface, morphology, nanoindentation.

Вступ.

Сучасний рівень розвитку технологій формування високоякісних поверхневих шарів у вигляді тонких плівок і покриттів зумовлює зростання їх використання практично у всіх областях науки і техніки, включаючи електроніку, оптику, машинобудування, транспорт, будівництво та інші. Це вимагає, з одного боку, збільшення досліджень у галузі фізичного матеріалознавства, що спрямовані як на вдосконалення технологій формування мікро- і нанорозмірних плівок, так і на досягнення їх високоякісних характеристик за складом, структурою та механічними властивостями. З іншої сторони, важливого значення набуває розробка теоретичних основ нанотехнології, моделювання поведінки нанорозмірних і наноструктурних об'єктів, наприклад, шаруватих нанокомпозитів [2, 3, 5]. У технологічному аспекті все більшого поширення набувають селективні хімічні та біологічні сенсори і датчики [13, 15], які створюються на базі тонкопліткових напівпровідникових структур, діелектриків і металів з істотно зменшеними розмірами електронних компонентів (тонкопліткових транзисторах, фоторезисторах, фотодіодах, нанокаталізаторах для паливних елементів). Комерційні приклади використання активності каталізаторів з нанорозмірних плівок і наночастинок золота показують, що вони можуть призвести до появи багатьох корисних технологій [1]. Сюди можна віднести каталізатори для контролю забруднення і викидів в навколишнє середовище, хімічну обробку сипучих і спеціальних хімікатів, виробництво чистого водню для паливних елементів, датчики для виявлення отруйних або горючих газів в розчині.

Серед перспективних та інноваційних технологій сьогодення провідне місце займають наноелектромеханічні системи [16], наноелектроніка [8] і її підрозділ – спін-

троніка [7], в якій поряд з зарядом частинок для фізичного представлення даних використовується спін частинок. Спінтроніка дозволяє у багато разів збільшити щільність запису і передачі інформації. При цьому особливий інтерес представляють одномірні структури – наноконтакти і нанодроти, на основі яких можливе формування високоефективних наносхем з малими розмірами і низьким споживанням електроенергії. Однак, в процесі формування наноконтактів і нанодротів в їх структурі виникають пружні напруження, які можуть значно змінити атомну структуру і геометрію дроту або контакту, аж до розриву структури, що згодом призводить до значної зміни їх механічних і квантових властивостей [10]. Крім того, сьогодні активно вивчаються властивості нанодротів і наноконтактів, сформованих на різних немагнітних підкладках. Нанодріт, сформований на підкладці, є першим прототипом нанорозмірної електронної схеми, тому вивчення взаємодій в системі «нанодріт-підкладка» є одним з пріоритетних напрямків наноелектроніки і спінтроніки.

Для подальшого розвитку даних напрямків особливо важливим стає вивчення пружних характеристик підкладок і їх механічних властивостей, оскільки навіть незначні деформації підкладки можуть змінювати її квантові властивості і, як наслідок, порушувати роботу створеного пристрою або всієї схеми. Електронні властивості одновимірних наноструктур суттєво залежать від їх атомної структури і геометрії. Наноконтакти і нанодроти є дуже неоднорідними системами, які характеризуються сильним неоднорідним розподілом пружних напружень [9, 14]. Тому попереднє вивчення впливу механічних деформацій на властивості системи і її стабільність є важливим процесом в області нанотехнологій.

На сьогоднішній день багато характеристик наноматеріалів і нанокомпозитів, таких як пружні властивості, міцність, вплив структури на властивості, ще недостатньо повно вивчені в силу труднощів в проведенні експериментів і через незастосовність загальних класичних аналітичних підходів механіки суцільних середовищ (відомо, що гіпотеза суцільності, взагалі кажучи, порушується у випадку нанорозмірних тіл) [4, 17]. Для реальних експериментів на нано- і мікромасштабних об'єктах потрібна складна, високоточна і дорога апаратура. Методики і схеми проведення експериментів часто унікальні. Тому, хоча кількість виконаних лабораторних експериментів і велика, вони ще не відрізняються різноманіттям. Відсутні стандартизовані методики проведення механічних випробувань наноструктурних нано- і мікромасштабних об'єктів. Відсутнє також метрологічне забезпечення таких випробувань.

У представленій роботі проведено вивчення структурних особливостей нанорозмірних плівок, а також створених на їх поверхні нанооб'єктів. Особливу увагу приділено розробці методики і дослідженню особливостей наноіндентування таких плівок для визначення їх механічних властивостей.

§1. Постановка задачі.

У даному дослідженні тунельна мікроскопія була використана для вивчення нанорозмірних плівок золота, індію та наночастинок золота, отриманих методом магнетронного розпилення. Нанорозмірні плівки та наночастинки золота наносились на поліровану поверхню монокристалічного кремнію, слюди та скла.

При магнетронному методі осадження плівки матеріал розпилюється за рахунок бомбардування поверхні мішені іонами робочого газу (зазвичай аргонем), що утворюються в плазмі аномального тліючого розряду. Для підвищення ефективності іонізації робочого газу та створення над поверхнею катода-мішені щільної плазми розряд відбувається в неоднорідних перехрещених електричних та магнітних полях. Важливою перевагою методу магнетронного розпилення є відсутність бомбардування підкладки вторинними електронами високої енергії, оскільки вони захоплюються магнітною пасткою. Це дозволяє уникнути перегріву поверхні підкладки і дозволяє розпорошувати плівки на матеріали з низьким термічним опором при високій швидкості осадження. Розглянутий метод наплення має дуже широкі можливості застосування.

Для модифікації поверхні, вивчення її морфології та створення мікро- та нанорозмірних структур застосовувався скануючий тунельний мікроскоп "Micro-nano mod" [11]. Модифікація поверхні здійснюється алмазним зондом-індентором, який одночасно може використовуватися, як гострий зонд для сканування поверхні і отримання її рельєфного (дво- або тривимірного) зображення. Реєстрація рельєфу поверхні відбувається з нанометровою роздільною здатністю. Крім того, за допомогою скануючого тунельного мікроскопа "Micro-nano mod" можна вимірювати вольтамперні характеристики тунельного переходу в різних точках поверхні, що дає можливість судити про локальну провідність зразка та вивчати особливості локальної щільності станів в енергетичному спектрі електронів [12]. Застосування алмазної піраміди Берковича як зонда дозволяє використовувати скануючий тунельний мікроскоп "Micro-nano mod" для наноіндентування досліджуваної поверхні [11]. Методом наноіндентування можна оцінити розмір і розподіл внутрішніх напружень, товщину, ступінь адгезії та механічні властивості тонких шарів та покриттів, визначити модуль пружності та анізотропію механічних властивостей. Всі вимірювання проводились на відкритому повітрі. Калібрування "Micro-nano mod" проводилося на основі калібрувальних стандартів для скануючого зондового мікроскопа NT-MDT та "FemtoScan".

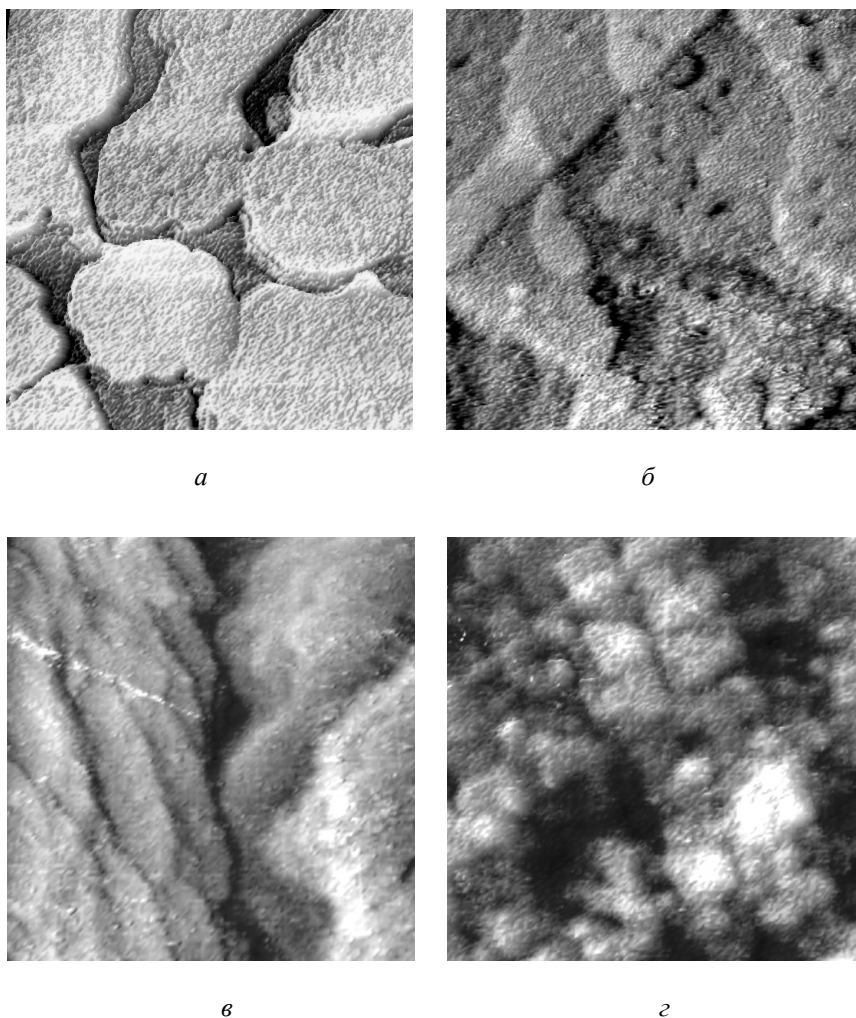


Рис. 1

Вивчення рельєфу поверхні зразка плівки золота на слюді після термічного відпалу отриманої шляхом сканування області 4×4 мкм дало можливість встановити, що її структурні утворення розподілені рівномірно і мають розміри від 250 до 500 нм [6]. Висота рельєфу плівки коливається від 30 до 50 нм. Більш детальне вивчення 3D зображення морфології поверхні плівки золота при скануванні площі 1×1 мкм (рис. 1, а) показує, що структурні елементи плівки мають багатошарову структуру з дуже розвиненим рельєфом поверхні. Висота рельєфу становить 50 нм. Спостерігається злиття окремих елементів структури. При цьому товщина шарів змінюється від 3 до 5 нм. Дослідження 3D зображення рельєфу поверхні структурних елементів плівки (рис. 1, а) вказує на те, що в результаті відпалу утворюється багатошарова поверхня (рис. 1, б). Сканування поверхні відбувалося площею 70×70 нм (висота рельєфу 11 нм). Аналіз отриманого 3D зображення поверхні демонструє, що окремі шари різної товщини розташовані один над одним. Розміри шарів змінюються від 2×2 нм до 15×59 нм, а товщина – від 0,6 – 0,9 нм до 1,5 – 2,5 нм. Шари мають різноманітну геометричну форму, а поверхня має дуже розвинутий нанорельєф. Дослідження заглиблень, утворених на поверхні окремих наночарів (рис. 1, б), демонструє також наявність багатошарової структури (рис. 1, в). Сканувалася область площею 30×30 нм. Висота рельєфу становила 6 нм, а висота шарів – від 0,3 до 1 нм. За допомогою скануючого тунельного мікроскопа "Мікро-папо mod" було встановлено (рис. 1, г), що структурними елементами золотої плівки є монокристали з просторовою орієнтацією (111). При цьому, сканувалася площа поверхні 18×18 нм, а висота рельєфу становила 3 нм.

Для встановлення особливостей наноіндентування та модифікації поверхні були виготовлені зразки нанорозмірних плівок індію та золота на склі (рис. 2, а, б).

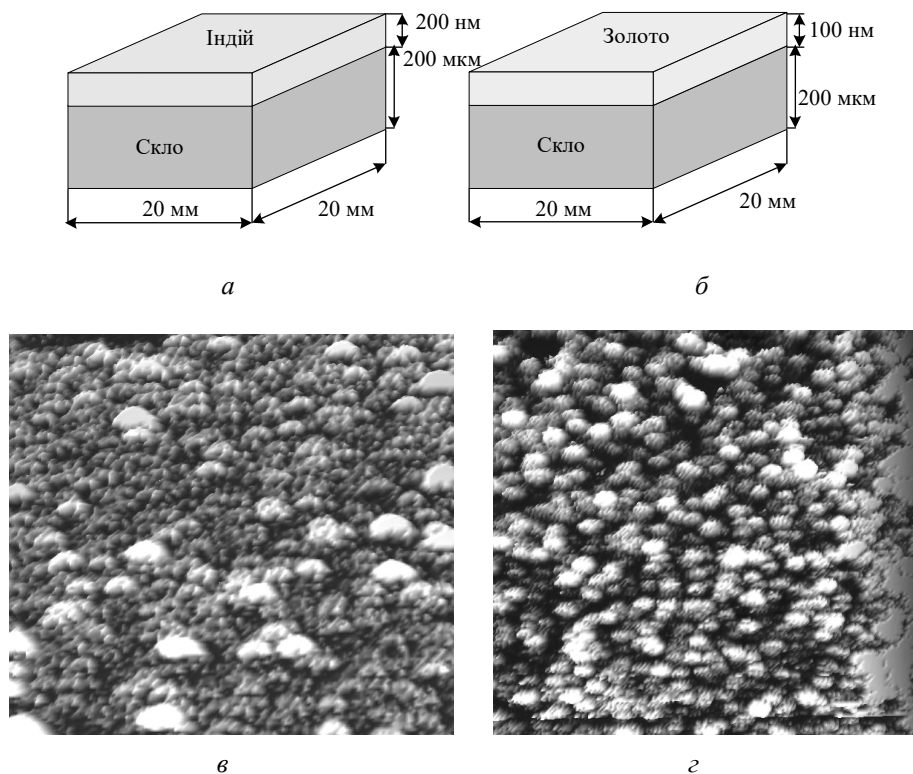


Рис. 2

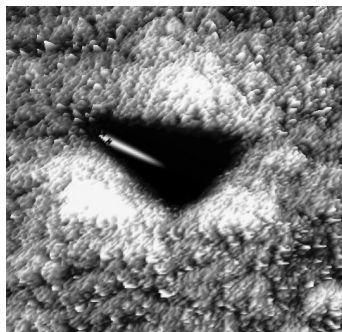
Результати сканування ("Мікро-папо mod") поверхні зразків нанорозмірних плівок індію та золота на склі, отриманих магнетронним напиленням, наведені на рис. 2, в, г.

Дослідження 3D зображення морфології поверхні отриманих наноплівки показало, що вони характеризуються дрібнозернистою структурою поверхні із середнім розміром зерен 90 нм. Аналіз морфології 3D зображення поверхні, отриманої скануванням площі 4×4 мкм (рис. 2, в, з) демонструє наявність яскраво вираженої острівної структури з розмірами 70 – 400 нм (індій) та 50 – 200 нм (золото). Природа досліджуваних острівців пов'язана з механізмом росту плівок, а саме з утворенням окремих острівців на поверхні підкладки, їхнім ростом і коалесценцією. Острівці – це ізольовані наночастинки з різною формою. У деяких районах спостерігається об'єднання окремих острівців, в результаті чого невелика частка наночастинок має видовжену форму. З рис. 2, в, з видно, що морфологія одержаних наноплівок значно розрізняється. Детальне вивчення морфології 3D зображення поверхні наноплівки золота при скануванні ("Micro-nano mod") області 4×4 нм дозволяє стверджувати, що структурними елементами плівки є частинки переважно сферичні, хоча також спостерігаються і частинки не сферичної форми. Розмір окремих наночастинок золота коливається від 50 до 160 нм. Товщина отриманої плівки коливається від 80 до 100 нм.

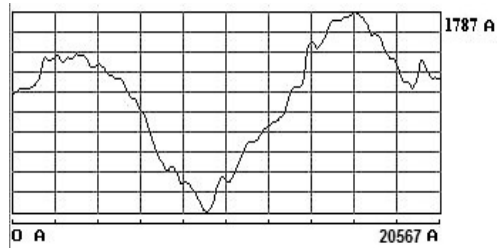
Сьогодні метод наноіндентування використовують не тільки для визначення нанотвердості, але й для оцінки модуля Юнга, адгезії, коефіцієнта в'язкості руйнування по розмірах тріщин навколо відбитка й сили вдавнення, вивчення фазових переходів за рахунок високого тиску під індентором. При проведенні наноіндентування потрібно мати на увазі, що обробка одержаних результатів пов'язана з певними труднощами. Особливо це стосується аналізу результатів, одержаних при індентуванні приповерхневих областей наноплівок та покриттів, які можуть мати високу шорсткість. Шорсткість на поверхні зразка впливає на визначення площі контакту, оскільки індентор торкається поверхні не в одному місці, а має кілька точок контакту. Розкид значень обумовлений також і неточностями у визначенні площі контакту індентора зі зразком при вимірі твердості. При наноіндентуванні плівки на підкладці з більш високою твердістю спостерігається видавлювання матеріалу плівки навколо пірамідки індентора ("pile-up"). В результаті реальна площа контакту виявляється більше розрахункової, що призводить до завищення вимірюваної твердості. У випадку ж наноіндентування плівок, нанесених на підкладку з меншою твердістю, відбувається вдавнення ("sink-in") матеріалу навколо відбитка індентора, що призводить до заниження вимірюваної твердості.

На рис. 3, а продемонстровано 3D зображення поверхні наноплівки індію після наноіндентування, отриманої за допомогою мікро-наномодифікатора ("Micro-nano mod"). Індентування відбувалося під навантаженням 2,2 сН, а площа сканування поверхні становила 2×2 мкм. Оскільки наноплівка індію знаходиться на скляній підкладці, яка має більш високу твердість, на рис. 3, а спостерігається видавлювання матеріалу (навали) при наноіндентуванні. Для вимірювання розмірів уколу та навалів на рис. 3, б наведено зображення профілю уколу. Глибина уколу при цьому навантаженні складає 178 нм. Навали не симетричні з різних боків уколу і становлять по висоті 35 та 72 нм, відповідно до рис. 3, б. Отже, для визначення глибини уколу та площі відбитку індентора необхідно враховувати навали. З врахуванням отриманих навалів при індентуванні з навантаженням 2,2 сН глибина уколу фактично становить 106 нм, а, отже, зменшиться площа відбитку та твердість наноплівки. Сукупність методів скануючої тунельної мікроскопії та наноіндентування об'єднаних в одному комплексі і на одному зонді мікро-нано модифікатора ("Micro-nano mod"), як було визначено вище, дозволяє розширити можливості стандартних зондових методів та бути одним із найбільш затребуваних у сучасних нанотехнологіях.

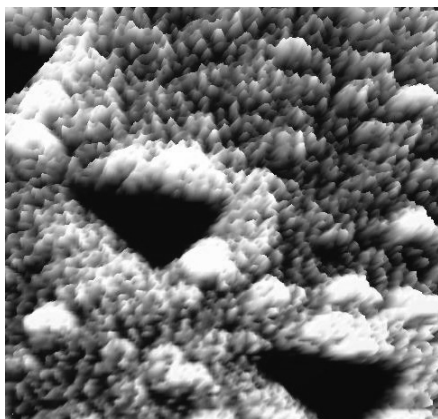
Застосування такого комплексу ("Micro-nano mod") при дослідженні поверхні дозволяє вивчати з плином часу зміни наноповерхні після наноіндентування та проводити необхідні виміри її механічних властивостей. На рис. 3, в продемонстровано 3D зображення поверхні індію (рис. 2, в) після декількох уколів індентором при навантаженні 2,5 сН. Область сканування поверхні становила 4×4 мкм, а висота рельєфу – 30 нм. Проведене сканування тієї ж самої поверхні площею 4×4 мкм після однієї години (рис. 3, з) дозволяє проаналізувати стан поверхні та зробити висновок, що через одну годину спостерігається спотворення відбитку та зменшення навалів в місцях індентування. Зменшуються не тільки навали, але і розміри відбитка індентора (рис. 3, з).



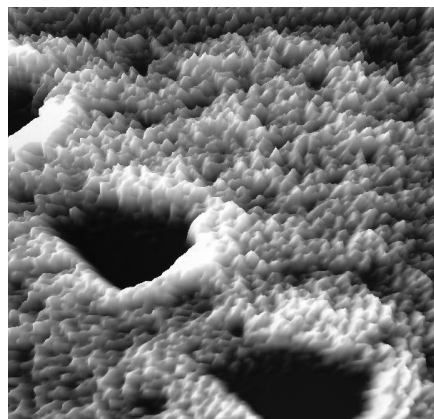
a



б

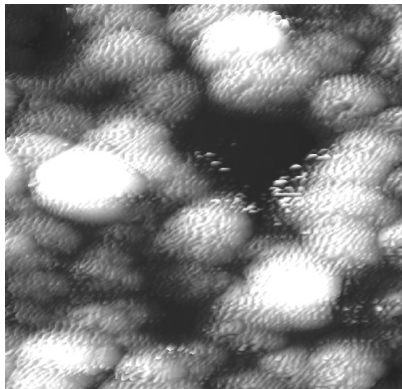


в

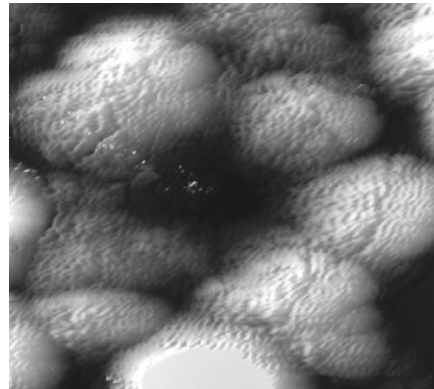


г

Рис. 3



a



б

Рис. 4

Проведене дослідження через три години дає можливість зробити висновки, що розміри відбитків продовжують зменшуватися, а навали зсипаються у відбиток. Відбувається природне відновлення поверхні за рахунок релаксації напружено-деформованого стану. Отримані результати вказують на ще одну особливість при наноіндентуванні. Всі механічні властивості та твердість досліджуваного матеріалу необхідно визначати одразу після наноіндентування, використовуючи при цьому скануючу тунельну мікроскопію та наноіндентування, об'єднані в одному комплексі і на одному зонді.

На рис. 4, *a* продемонстровано 3D зображення поверхні золота (рис. 2, *з*) після уколу індентором при навантаженні 2 сН. Область сканування поверхні становила 1×1 мкм, а висота рельєфу – 45 нм. Після наноіндентування спостерігається не трикутна форма індентора Берковича. Сферичні наночастинки золота в деяких місцях насуваються одна на одну, деформуючись при цьому (рис. 4, *a*). На рис. 4, *б* демонструється 3D зображення тієї ж самої поверхні через 45 хвилин, але площа сканування становила 500×500 нм при висоті рельєфу 30 нм. З плином часу (45 хвилин), як видно на рис. 4, *б*, спостерігається релаксація напружено-деформованого стану. Наночастинки більш щільно зсуваються, спотворюючи відбиток індентора. За цей час змінилася площа відбитку, а отже і твердість та інші механічні характеристики. Аналіз отриманих результатів дає можливість стверджувати, що для ноноіндентування такого типу наноплівки золота слід використовувати зонд з вершиною 50 нм і менше. Останнє буде забезпечувати можливість індентування острівців, а не проходження повз них, розсовуючи їх. Визначати механічні властивості необхідно досить швидко, оскільки з плином часу сферичні частинки золота для балансу напружено-деформованого стану зміщуються для закриття відбитка отриманого при наноіндентуванні. За рахунок зближення наночастинки золота деформуються та навіть поглинають одна одну; відбиток зникає.

За допомогою мікро-нано модифікатора ("Micro-nano mod") можливе безконтактне формування нанорельєфу на поверхні металевих підкладок та міжелектродний масопереніс із нанометровою роздільною здатністю. При цьому особливий інтерес представляють одномірні структури – наноконтакти і нанодроти, на основі яких можливе формування високоефективних наносхем з малими розмірами і низьким споживанням електроенергії.

Застосування скануючого тунельного мікроскопу "Micro-nano mod" дає можливість одержання доріжок, канавок і горбків нанометрових розмірів. При цьому, залежно від знаку потенціалу, прикладеного до підкладки, можливе осадження на поверхню, або зняття з поверхні матеріалу. Все це спонукає до створення методики одержання та дослідження нанооб'єктів для використання в нанoeлектроніці.

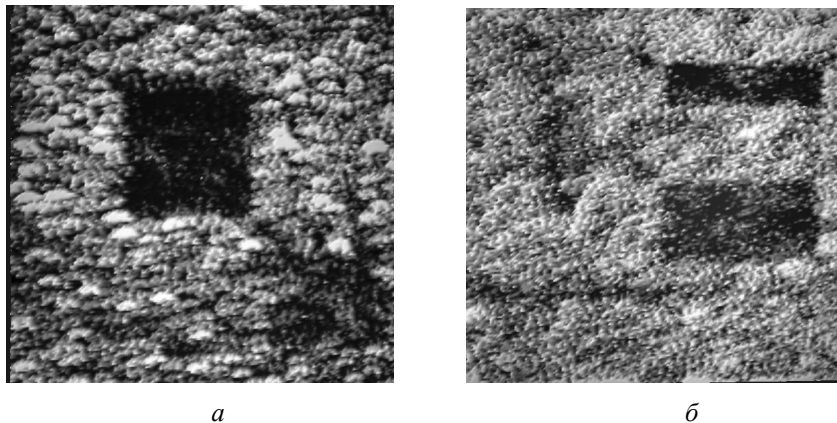


Рис. 5

На рис. 2, *в* зображено рельєф поверхні нанорозмірної плівки індію, на якій було проведено безконтактну модифікацію тунельним струмом. На рис. 5, *a* продемонстровано нанооб'єкт у вигляді контактної площадки, створений при модифікації поверхні безконтактним способом із застосуванням однопрохідної методики. Розміри нанооб'єкту у вигляді квадрату становили 1×1 мкм, а глибина створеного нанооб'єкту – близько 15 нм. На рис. 5, *б* показано групу нанооб'єктів у вигляді нанодоріжок (дротів), отриманих за рахунок модифікації поверхні безконтактним способом із застосуванням двохпрохідної методики. Розміри нанооб'єктів у вигляді доріжок (дротів) становили, відповідно, $1,5 \times 0,4$ мкм та $1,5 \times 0,8$ мкм, а глибина створених нанооб'єктів – близько 7 нм. При додатковому дослідженні було встановлено значну чутливість принципової можливості проведення такого роду модифікації від умов отримання напиленої наноплівки індію.

Висновки.

Встановлено, що структурні утворення наноплівки золота на слюді після термічного відпалу розподілені рівномірно і мають розміри від 250 до 500 нм. Висота рельєфу півки коливається від 30 до 50 нм. Більш детальне вивчення морфології поверхні півки золота показує, що структурні елементи півки мають багатошарову структуру з дуже розвиненим рельєфом поверхні. Спостерігається злиття окремих елементів структури. При цьому товщина шарів змінюється від 3 до 5 нм. Сканування поверхні окремих елементів площею 70×70 нм (висота рельєфу 11 нм) демонструє, що окремі шари різної товщини розташовані один над одним. Розміри шарів змінюються від 2×2 нм до 15×59 нм, а товщина – від 0,6 до 2,5 нм. Шари мають різноманітну геометричну форму, а поверхня має дуже розвинутий нанорельєф. Дослідження заглиблень, утворених на поверхні окремих наночастинок, демонструє також наявність багатошарової структури. Висота рельєфу становила 6 нм, а товщина шарів – від 0,3 до 1 нм. При скануванні площі поверхні 18×18 нм (висота рельєфу 3 нм) скануючим тунельним мікроскопом "Misto-nano mod" було встановлено, що структурними елементами золотої наноплівки є монокристали з просторовою орієнтацією (111).

Аналіз морфології поверхні нанорозмірних півок індію та золота на склі, отриманих магнетронним напиленням, демонструє наявність яскраво вираженої острівної структури з розмірами 70 – 400 нм (індій) та 50 – 200 нм (золото). Спостерігається об'єднання окремих острівців, в результаті чого невелика частка наночастинок має видовжену форму. Вивчення морфології поверхні наноплівки золота дозволяє стверджувати, що структурними елементами півки є частинки переважно сферичної форми, хоча також спостерігаються і частинки іншої геометрії.

При індентуванні нанорозмірної півки індію спостерігається видавлювання матеріалу (навали). Індентування відбувалося під навантаженням 2,2 сН. Глибина уколу при цьому навантаженні складає 178 нм. Навали є несиметричними з різних боків уколу і становлять по висоті 35 нм та 72 нм, відповідно. З врахуванням отриманих навалів при індентуванні глибина уколу фактично становить 106 нм, що дуже важливо для визначення дійсної глибини уколу та площі відбитку індентора. Проведено дослідження відбитків на наноповірни індію з плinom часу після наноіндентування. Індентування відбувалося при навантаженні 2,5 сН. При цьому спостерігаються релаксаційні зміни, які відбуваються с плinom часу (1 година) і призводять до неминучої втрати інформації щодо початкової морфології поверхні після індентування. Всі механічні властивості та твердість досліджуваного матеріалу необхідно визначати одразу після наноіндентування, використовуючи при цьому скануючу тунельну мікроскопію та наноіндентування, об'єднані в одному комплексі і на одному зонді.

Після індентування наноплівки золота при навантаженні 2 сН не спостерігається трикутна форма індентора Берковича. Сферичні наночастинок золота в деяких місцях насуваються одна на одну, деформуючись при цьому. З плinom часу (45 хвилин) спостерігається релаксація напруженого стану наноплівки. Наночастинок щільніше зсуваються, спотворюючи відбиток індентора. За рахунок зближення наночастинок золота деформуються та навіть поглинають одна одну, і, як результат, відбиток зникає. Аналіз отриманих результатів дає можливість стверджувати, що для наноіндентування такого типу нанопівок золота слід використовувати зонд з вершиною 50 нм і менше. Останнє буде забезпечувати можливість індентування острівців а не проміжків між ними, що призводить до їх розсування. Отже, отримання результатів вимірювання механічних властивостей необхідно здійснювати у найкоротший часовий проміжок.

Показано принципову можливість безконтактної модифікації тунельним струмом поверхні наноплівки індію для створення на ній нанооб'єктів. Отримано нанооб'єкт у вигляді контактної площадки із застосуванням однопрохідної методики. Розміри нанооб'єкту у вигляді квадрату становили 1×1 мкм, а глибина створеного нанооб'єкту – близько 15 нм. Продемонстрована можливість створення групи нанооб'єктів у вигляді нанодоріжок (дротів), отриманих шляхом модифікації поверхні безконтактним способом із застосуванням двоохпрохідної методики. Розміри нанооб'єктів у вигляді доріжок (дротів) становили, відповідно, $1,5 \times 0,4$ мкм та $1,5 \times 0,8$ мкм, а глибина створених нанооб'єктів – близько 7 нм. При додатковому дослідженні було встановлено значну чутливість такого роду модифікації до умов отримання напиленої наноплівки індію.

РЕЗЮМЕ. В роботі за допомогою скануючого тунельного мікроскопу "Micro-nano mod" досліджено морфологію поверхні півки золота на слюді після термічного відпалу. Воно показало, що структурними елементами нанопівки є монокристали з просторовою орієнтацією (111). Морфологія поверхні нанорозмірних півок індію та золота на склі, отриманих магнетронним напиленням, має виражену дрібнозернисту структуру. Показано, що фактичну глибину уколу при індентуванні нанорозмірної півки індію можна визначити після врахування отриманих навалів і релаксаційних змін індентування протягом часу. Встановлено, що відбиток, отриманий індентацією золотої нанопівки, може зникнути з часом внаслідок деформації і взаємного поглинання наночастинок золота. Показано принципову можливість створення нанооб'єктів тунельним струмом на поверхні нанопівки індію у вигляді нанодоріжок-дротів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нанорозмірні півки, нанооб'єкти, поверхня, морфологія, наноіндентування.

1. Della Pina C., Falletta E., M. Rossi M. Update on selective oxidation using gold // Chemical Society Reviews. – 2012. – **41**. – P. 350-369.
2. Guz A.N., Rushchitsky J.J., Guz I.A. Establishing Fundamentals of the Mechanics of Nanocomposites // Int. Appl. Mech. – 2007. – **43**, N 3. – P. 247 – 271.
3. Guz A.N., Rushchitsky J.J. Establishing Foundations of the Mechanics of Nanocomposites (Review) // Int. Appl. Mech. – 2011. – **47**, N 1 – P. 2 – 44.
4. Guz A.N., Rushchitsky J.J. Analysis of Structurally Complex Nanocomposites (Review) // Int. Appl. Mech. – 2011. – **47**, N 4. – P. 351 – 409.
5. Hashemi M., Zhuk Y.A. Thermomechanical Stability and Thermal Fatigue Failure of Nanocomposite Structural Elements under Static and Cyclic Loading. – Lambert Academic Publishing, 2018. – 208 p.
6. Havryliuk D., Zhuk Y., Melnichenko M. Research of surface relief morphology of nanosized gold films by the method of scanning tunnel microscopy // Proc. are available in IEEE Xplore Digital Library., IEEE 40th Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2020. – P. 463 – 449.
7. Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y., Prejbeanu L., Diény B., Pirro P., Hillebrandse B.. Review on spintronics: Principles and device applications // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – **509**. – P. 166711.
8. Kaur I., Yadav S., Singh S., Kumar V., Arora S., Bhatnagar D. Nano Electronics: A New Era of Devices // Solid State Phenomena, Trans. Tech. Publications, Ltd. – 2014. – 222. – P. 99 – 116.
9. Lah N.A.C., Trigueros S. Synthesis and modelling of the mechanical properties of Ag, Au and Cu nanowires // Sci. Technol. Adv. Mater. – 2019. – **20**, N 1. – P. 225 – 261.
10. Liu M., Han Y., Tang L., Jia J.F. et al. Interplay between quantum size effect and strain effect on growth of nanoscale metal thin films // Physical Review B. – 2012. – **86**, N 12. – P. 125427.
11. Luchenko A., Melnichenko M. Nanoindentation for surface modification of nanofilms // Conf. Proc., SPIE Optics + Photonics 2015. – 2015. – V. 9556. – P. 955619-1- 955619-6.
12. Luchenko A.I., Svezhentsova K.V., Melnichenko M.M. Local Electronic Properties of the Surface of the Nanostructured Silicon Layers // Proc. are available in IEEE Xplore Digital Library., IEEE 36th Int. Con. on Electronics and Nano-technology (ELNANO). – 2016. – P. 43 – 46.
13. Manoto S., Malabi R., Ombinda-Lemboumba S., Mthunzi-Kufa P. Bioconjugation of gold nanoparticles for surface plasmon sensor // Proc. SPIE 10894, Plasmonics in Biology and Medicine XVI. – 2019. – 108941D.
14. Meguid S.A., Weng G.J. Micromechanics and Nanomechanics of Composite Solids. – Springer, 2018. – 519 p.
15. Nguyen H.H., Park J., Kang S., Kim M. Surface Plasmon Resonance: A Versatile Technique for Biosensor Applications // Sensors. – 2015. – **15**. – P. 10481 – 10510.
16. Rahimi Z., Rashahmadi S. Thermoelastic Damping in FGM Nano-Electromechanical System in Axial Vibration Based on Eringen Nonlocal // Int. Appl. Mech. – 2017. – **53**, N 6. – P. 727 – 734.
17. Zhuk Y.A., Guz I.A. Influence of Prestress on the Velocities of Plane Waves Propagating Normally to the Layers of Nanocomposites // Int. Appl. Mech. – 2006. – **42**, N 7. – P. 729 – 743.

Надійшла 16.07.2021

Затверджена до друку 19.07.2022