

PACS numbers: 07.79.Fc, 07.79.Lh, 68.37.Ps, 68.37.Uv, 81.07.Pr, 81.16.-c, 82.50.-m

Темплат як інструмент групової нанотехнології

Д. О. Гринько, Ю. М. Барабаш*, Є. Г. Борцагівський, М. А. Заболотний**,
Л. Ю. Куницька***, О. С. Литвин, С. О. Сперкач****, М. Ю. Барабаш****

*Інститут фізики напівпровідників НАН України,
просп. Науки, 41,
03650, МСП, Київ-39, Україна*

**Інститут фізики НАН України,
просп. Науки, 46,
03650, МСП, Київ-39, Україна*

***Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64,
01033 Київ, Україна*

****Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України,
вул. Наумова, 17,
03164 Київ, Україна*

*****Технічний центр НАН України,
вул. Покровська, 13,
04070 Київ, Україна*

Розроблено методику формування темплату на основі фоточутливих наноконпозиційних матеріалів в електрофотографічному процесі. Просторова модуляція рельєфу поверхні та вбудованого в плівку заряду здійснюється методами оптичної голографії за допомогою експозиції світловим полем. Методами оптичної мікроскопії та сканівної силової мікроскопії показано, що формування нанокластерів золота при напорошенні на поверхню темплату у вакуумі відбувається лише у певних, просторово упорядкованих областях поверхні.

Technique for photosensitive nanocomposite-template fabrication in electro-photographic process is elaborated. Spatial modulation of both the surface relief and the trapped charge is performed by optical-holography technique using exposure in a light field. As shown by atomic force microscopy and near-field optical microscopy, the nucleation of gold nanoclusters, which occurs during the deposition on template surface in a vacuum, takes place only in certain, spatially ordered areas of the surface.

Разработана методика формирования темплата на основе фоточувстви-

тельных нанокпозиционных материалов в электрофотографическом процессе. Пространственная модуляция рельефа поверхности и встроенного в пленку заряда осуществляется методом оптической голографии при помощи экспозиции световым полем. Методами оптической микроскопии и сканирующей силовой микроскопии показано, что формирование нанокластеров золота при напылении на поверхность темплата в вакууме происходит только в определенных, пространственно упорядоченных областях поверхности.

Ключові слова: темплат, електрет, оптична голографія, електрофотографічний процес, атомове впорядкування, самоорганізація.

(Отримано 28 грудня 2007 р.)

1. ВСТУП

Проблема структурування матеріалів у наномасштабі, зокрема, організація процесів упорядкування нанооб'єктів за допомогою темплатів, є одним із основних напрямків розвитку нанотехнологій. Темплат є інструментом для організації у просторі та часі фізико-хімічних процесів структурування нанооб'єктів на поверхні матеріалів різної природи за рахунок ближньопольової взаємодії нанооб'єктів із структурою темплату.

У молекулярній біології темплат розглядають як макромолекулярну модель для синтезу інших макромолекул. У нанотехнології темплатний синтез визначають як дизайн матеріалів визначеного розміру, форми та з певними хімічними властивостями поверхні [1]. Темплат можна розглядати [2, 3] як атрибут супрамолекулярної хімії. На відміну від традиційної хімії, яка, маніпулюючи хімічними зв'язками із обмеженого набору елементів утворює нескінченний світ молекул, супрамолекулярна хімія використовує невалентні взаємодії для створення та організації супермолекулярних ансамблів із обмеженого набору молекул. В супрамолекулярній хімії визначними факторами є розмір та форма або просторова комплементарність молекул. Методи супрамолекулярної хімії дозволяють об'єднати координаційно-насичені молекули, які не вступили у хімічну взаємодію, у нові хімічні об'єкти з новими фізичними та хімічними властивостями.

Вважають [4], що закономірності структуроутворення зумовлені певною просторовою організацією атомів, молекул, наночастинок або структурних фрагментів як мінімум у масштабі нано- та мікро-розмірів завдяки надзвичайно складній ієрархічній організації взаємодій у відкритих системах. Тому одним із небагатьох ефективних способів створення нових матеріалів є використання темплатів — таких систем, які ініціюють формування структур із заданим типом упорядкування складових елементів. Вплив темплату на оточення

може досить ефективно відбуватися за рахунок різних міжатомних та міжмолекулярних взаємодій [5, 6], зокрема досить далекодіючих електростатичних. Наприклад, молекули ДНК використовувалися [5, 7] як темплат для формування нанониток срібла. Сорбція певних сполук срібла поверхнею самовпорядкованої структури із молекул ДНК дозволила сформувати структуру із нанониток діаметром 2, 5 та 10 нм, на основі яких було створено квантові одновимірні структури для сенсорів. Ефект сорбції ДНК на певних дефектах кристалічної структури тонких металевих плівок застосовували [8] для впорядкування. Потім одержана структура використовувалася як маска для літографії. Метод одержав назву «тіньова ДНК-нанолітографія».

Трекові мембрани, які утворюються при опроміненні плівкових полімерних матеріалів високоенергетичними частинками, наприклад у прискорювачах, мають канали діаметром порядку одиниць та десятків нанометрів. Такі мембрани використовують як нерегулярні темплати для формування нанодротів, нанотрубок та структур на їх основі [5]. Надзвичайно ефективним виявилось застосування трекових мембран для виготовлення мембранних фільтрів молекулярного розпізнавання. Порожнини треків оброблялися комплексоутворювачами, що модифікують поверхню внаслідок взаємодії із вільними радикалами та фрагментами каналу. В результаті хімічного щеплення поверхня треку вкривається певними хімічними групами, які є комплексарними до заданих хімічних сполук. Такі мембрани виявляють високу селективність до певних сполук у водних розчинах.

Плівки анодного оксиду алюмінію на поверхні алюмінію високої чистоти здатні створювати квазіперіодичні структури лунок при хімічному травленні у селективних розчинниках [5]. Товщина плівки анодного оксиду алюмінію і густина пор залежать від режимів попереднього хімічного та електрохімічного травлення плівки алюмінію. За оптимальних режимів травлення густина пор досягла $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Система лунок може бути використана як маска для подальшої хімічної, плазмохімічної або електрохімічної обробки алюмінієвої підкладки. У 2004 р. компанія «Інфінон Текнолоджиз» повідомила [9] про розробку технології виготовлення масивів польових транзисторів, які використовують нанотрубку в якості електропровідного каналу довжиною 18 нм і діаметром 0,7–1,1 нм. Для виготовлення масивів транзисторів з густиною 10^{11} см^{-2} використовували темплат із оксиду алюмінію, в каналах якого розміщували каталізатор і вирощували вуглецеві нанотрубки.

Іншою самоструктурованою речовиною є опал, що утворюється в результаті кристалізації колоїдних частинок на основі оксиду кремнію в щільноупаковані решітки [10, 11]. Наносфери діаметром 80–400 нм із полімерних матеріалів, що утворюють регулярну структуру на поверхні гідрофільної підкладки під дією капілярних сил, використовують як тіньову маску під час вакуумного напоро-

шення металу. В результаті на підкладці утворюється система регулярно розташованих металевих острівців, яка використовується для побудови приладів наноплазмоніки. Тривимірні структури із полімерних наносфер, зібрані у щільноупаковані структури за допомогою капілярних сил та зварені між собою при термічному відпалі у вакуумі [12] являють собою фотонно-кристалічні решітки.

Наноімпрінтинг — це метод переносу рідини у канавках твердого темплату для формування масок. Компанія ІВМ анонсувала [13] технологію наноімпрінтингу для автопозиціювання окремих наночастинок у канавках темплату і переносу їх на підкладку. Технологія використовується для формування електролюмінесцентних джерел світла, сенсорів та транзисторів на основі окремих наночастинок, точно розміщених по відношенню до електродів.

Формування високовпорядкованих масивів нанониток функціоналізованого полімеру здійснювали шляхом витягування гребінчастого темплату із розчину [14]. Нанонитки формувалися за рахунок капілярного стягування розчину функціоналізованого ДНК між вітями темплату. Масив упорядкованих одновимірних об'єктів використовували для побудови сенсорів.

Створення тунельного та атомно-силового мікроскопів надало можливість маніпулювати окремими атомами та наночастинами, будувати з них упорядковані молекулярні структури. Ці методи дослідження надають великий обсяг різнобічної та найдетальнішої інформації щодо нанооб'єктів, але вони по суті є індивідуальними. Це обмежує їх практичне застосування у промисловому виробництві. Масове виробництво ґрунтується на використанні групових методів. Одним із таких методів у сучасних нанотехнологіях може бути організація процесів самовпорядкування нанооб'єктів за допомогою темплатів, коли морфологія чи топологія поверхні темплату використовуються для формування заданих об'єктів. Такі темплати виступають фактично у ролі маски. Їх формування та використання може досить ефективно реалізовуватися методами літографії.

Аналіз механізмів невалентних взаємодій показує, що для формування темплатів перспективним є використання електростатичних взаємодій з огляду на їх далекодію та значні енергії взаємодії. Суттєвою перевагою електростатичних (або електретних) темплатів є те, що топологія розташування зарядів поблизу поверхні темплату безпосередньо використовується для організації речовини на поверхні темплату без формування масок. Другою перевагою можна вважати можливість просторової локалізації заряду в темплаті, яка, обмежується молекулярною (для високоомних фотопровідників) або доменною (для сегнетоелектриків) структурою.

Отже, тонкі плівки фотопровідних матеріалів можна розглядати як середовище, а електрофотографічний процес — як інструмент для формування темплатів. Рельєфна та польова топології поверхні

темплату формуються в електрофотографічному процесі за допомогою експозиції світловим полем [15, 16]. Розмір темплату становить кілька квадратних сантиметрів. Характерна просторова протяжність сформованих таким чином структур лежить в субмікронному діапазоні. Напруженість електричного поля на поверхні темплату складає 100 МВ/м. Локальні поля поверхні плівки компенсуються нанесенням органічних молекулярних сполук, наночастинок, композитів органіка–неорганіка та біологічних об'єктів [17]. Топологічний мотив темплату викликає просторову організацію нанооб'єктів на його поверхні, яка контролюється сучасними оптичними методами [18, 19].

Метою роботи є розробка методики виготовлення темплатів на основі фоточутливих наноконпозиційних органічних молекулярних матеріалів в електрофотографічному процесі дослідження та їх фізичних властивостей.

2. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Карбазолмісткі органічні молекулярні наноконpozити є ефективними фотопровідниками в електричних полях 30–100 МВ/м. Для цих наноконpozитів із зниженням напруженості електричного поля їх фото- та електропровідність зменшується експоненційно [20, 21] і матеріали набувають діелектричних властивостей. В наших експериментах висока фотопровідність тонкоплівкового матеріалу необхідна для формування просторового розподілу фотоструму у відповідності з інтенсивністю експонуючого світлового поля, яке задає топологію та розміри темплату. Важливим параметром є і час діелектричної релаксації захопленого в пастки заряду, який визначає максимальний термін між формуванням електретного стану плівки та осадженням функціоналізуючих сполук на поверхню темплату.

Фотопровідний шар одержували спільною конденсацією на підложжі у вакуумі молекулярних пучків CdSe та 2,4,7-тринітро-9-флуоренону випаровуванням із комірок Кнудсена та продуктів мономеру *N*-вінілкарбазолу, додатково збуджених електронним пучком з енергією 400 еВ та густиною струму 0,7 мА/см² з використанням методик [22, 23]. В якості підкладок використовували скло із шаром електропровідного оксиду олова опором 20 Ом/кв. Склад наноконpozитів оцінювали методом кварцового резонатора шляхом порівняння зміни резонансної частоти датчиків, розміщених у молекулярних пучках трьох компонентів. Одержаний фотопровідник, що містить 1,5% (мас.) CdSe та 0,3% (мас.) 2,4,7-тринітро-9-флуоренону, мав область спектральної чутливості 300–850 нм; голографічна чутливість при дифракційній ефективності 1% складала 100 м²/Дж, полоса просторових частот 300–1000 лін/мм при товщині плівки 820 нм.

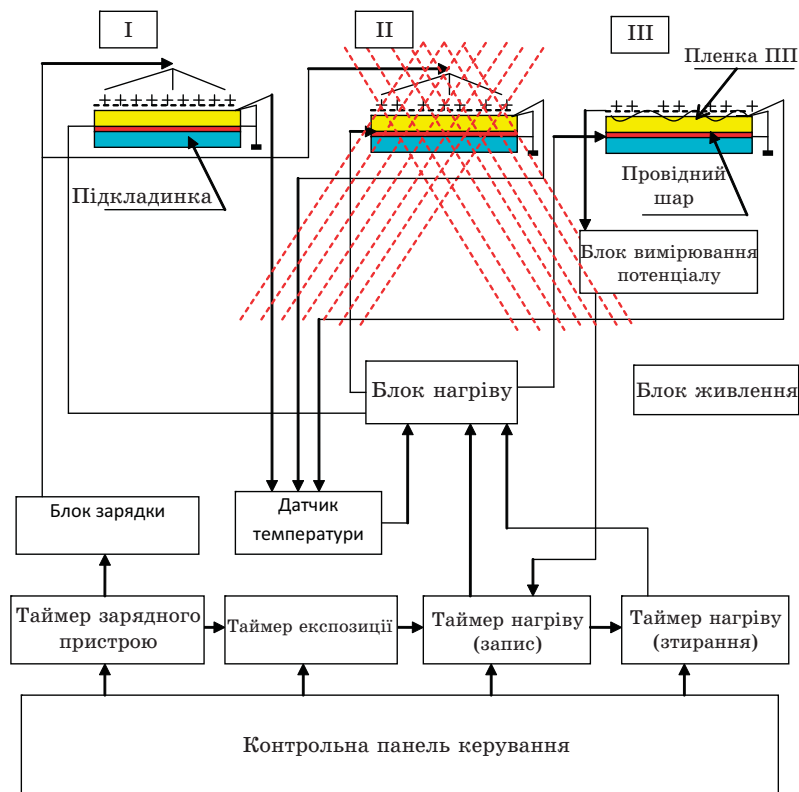


Рис. 1. Схема запису голограми: I — підготовка до реєстрації голограми (рівномірна зарядка поверхні плівки в коронному розряді); II — експозиція голограмою, під час якої відбувається модуляція поверхневої густини електростатичного заряду і створення електростатичного зображення на поверхні плівки в результаті фотоіндукованої провідності; III — проявлення голограми контрольованим швидким нагріванням плівки (модульоване електростатичне зображення перетворюється у рельєф поверхні плівки).

Зразок із плівкою нанокompозиту розміщували поблизу аноду коронуючого пристрою в повітряній атмосфері. В результаті осадження іонів на поверхні плівки в темряві формували однорідно розподілений позитивний поверхневий заряд за методиками [24, 25]. Потенціал поверхні плівки при цьому становив 120 В.

Формування локалізованого заряду в плівці нанокompозиту здійснювали електрофотографічним методом [24, 25] при експозиції зразка голограмою за трипроменевою схемою. Автоматична реєстрація голограм на плівці нанокompозиту включає три основні стадії (рис. 1).

Розподіл інтенсивності у експонуючому світловому полі формує топологію темплату. Формування найпростішого світлового поля у

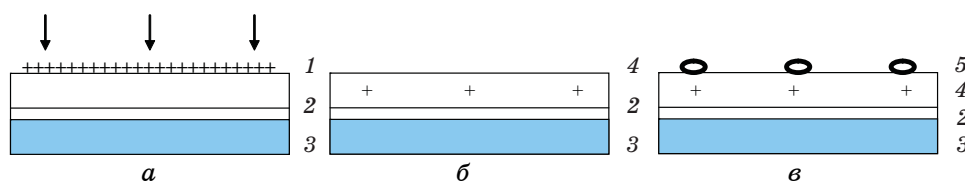


Рис. 2. Схема формування на поверхні темплату системи впорядковано розташованих кластерів золота: *a* — експозиція голографією зарядженої плівки фото-провідника; *б* — утворення захоплених зарядів при експозиції; *в* — адсорбція золота в пучностях електричного поля при напиленні у вакуумі та утворенні кластерів; 1 — заряд на поверхні плівки; 2 — плівка фото-провідника; 3 — електропровідна підкладка; 4 — захоплений електричний заряд, просторово модульований освітленням; 5 — адсорбовані нанокластери.

вигляді двовимірної решітки здійснюють за допомогою двох інтерферуючих лазерних променів. Кут між променями визначає фазовий зсув і, отже, просторову частоту решітки. Змінюючи кількість лазерних променів, їх взаємне розташування у просторі та додатково модулюючи амплітудними або фазовими транспарантами можна створити світлове поле певного класу симетрії із наперед заданим розподілом інтенсивності. В наших експериментах для експозиції темплату використовували три лазерних променя, спрямованих на підкладку вздовж бічної поверхні правильного конуса із кутом при вершині 25° .

При експозиції світлом плівки наноконвенту в електричному полі плоского конденсатора, утвореного електропровідною підкладкою та поверхневим зарядом, відбувається фотогенерація носіїв струму і виникає фотопровідність [25]. Густина струму фотопровідності виявляється модульованою інтенсивністю світлового поля, яким експонують поверхню плівки. В результаті протікання фотострумів зменшується потенціал поверхні плівки. Після завершення експозиції на поверхні формується неоднорідний розподіл поверхневого заряду. Густина поверхневого заряду промодульовано експонуючим світловим полем. Модульоване у просторі поле поверхневих зарядів здатне деформувати поверхню плівки при її розм'якшенні. Час формування рельєфу поверхні складав кілька секунд. Відтвореність характеристик забезпечувалась автоматизацією процесу реєстрації голограми за допомогою керуючого модуля [26].

При протіканні фотострумів через плівку може відбуватися також захоплення носіїв заряду на глибокі пастки і формування об'ємного локалізованого заряду, промодульованого експонуючим світловим полем. Ймовірність захоплення зарядів визначається густиною та енергетичними характеристиками глибоких пасток, які в наших експериментах формувалися при осадженні наноконвенту ту співконденсацією у вакуумі. Отже, в місцях опромінення плівки

можливе формування не тільки рельєфу (рельєфного темплату), а й захопленого заряду (електретного темплату) за схемою рис. 2. Густина локалізованого електричного заряду виявляється модульованою пропорційно інтенсивності світлового поля у експонуючій голограмі і, отже, має ту саму топологію.

В якості функціоналізуючого матеріялу для формування темплату шляхом нанесення на поверхню використовували золото, з огляду на високу поляризованість його атомів в електричному полі, стабільність в звичайних умовах, нескладність вакуумного напорошення та простоту дослідження його найтонших осадів доступними методами.

Напорошення золота виконували термічним методом при тиску залишкових газів $p \sim 10^{-2}$ Па випаровуванням із танталового човника. Час збереження зразка у темряві між операціями формуванням електретного стану та конденсацією золота у вакуумі становив 3 доби.

Дослідження зразків проводили за схемою на просвіт на оптичному мікроскопі Біолам при збільшенні 800. Морфометрію поверхні досліджували на сканівному атомно-силовому мікроскопі (АСМ) NanoScope IIIa в періодичному контакті кремнієвим зондом із номінальним радіусом заокруглення вістря 10 нм.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Зображення поверхні темплату в оптичному мікроскопі наведено на рис. 3. Двовимірною просторово періодичною структурою сформована модульованим рельєфом поверхні плівки рис. 3, *a* являє собою топологію світлового поля експонуючої голограми.

В результаті вакуумного термічного напорошення золота на повер-

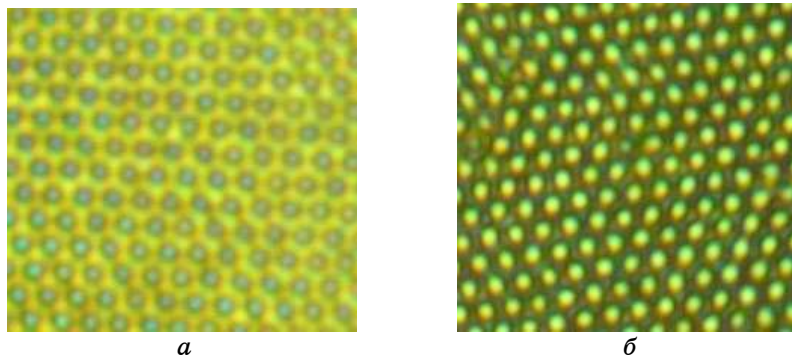


Рис. 3. Зображення зразків плівок у оптичному мікроскопі: *a* — рельєф поверхні; *б* — сорбовані на поверхні золоті частинки (темні області). Період структури близько 2 мкм.

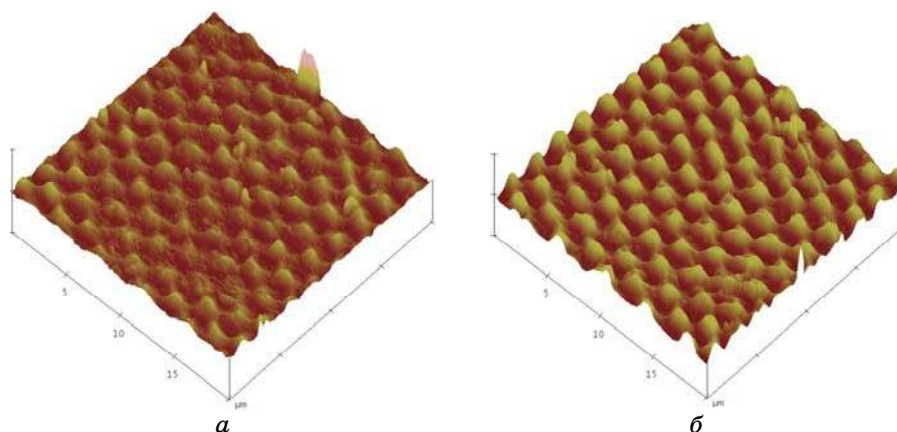


Рис. 4. Тривимірне зображення рельєфу поверхні плівки, одержане методом АСМ: *a* — рельєф полімерної плівки після запису голограми; *b* — рельєф поверхні після нанесення золота на полімерну плівку *a*. Масштаб горизонтальний — 5 мкм/поділку, вертикальний — 1000 нм/поділку.

хню темплату формується структура рис. 3, *b*, яка є системою просторово впорядкованих золотих острівців. Характерно, що золото конденсується у певних, чітко локалізованих областях, а не рівномірно розподіляється на поверхні. Слід було чекати, що при напиленні золота на рельєфну поверхню, золото також буде конденсуватися на дні лунок, але це не відбулося. Порівняння рис. 3, *a* та 3, *b* дозволяє зробити висновок, що розташування та симетрія нанесених напорошенням нанокластерів золота задаються топологією світлового поля (голограми), яке було використане для формування темплату.

Поверхня полімерного темплату має періодичний рельєф висотою біля 350 нм (рис. 4–5), тоді як темплату із шаром золота — 500 нм. Таким чином, можна приблизно визначити середні розміри золотих острівців: діаметр становить 400–600 нм, висота — 150 нм.

Із співставлення топології експонуючого світлового поля, яка в нашому експерименті візуалізується у вигляді профілю рельєфу поверхні рис. 4, *a* та рис. 5, *a*, з топологією золотого осаду рис. 4, *b* та рис. 5, *b*, можна зробити висновок, що золоті острівці формуються виключно в областях максимальної інтенсивності світла, які відповідають максимальній напруженості локального поля захопленого заряду в області поверхні. Електричне поле із значним градієнтом напруженості локалізовано поблизу поверхні темплату в області розташування електричного заряду, захопленого в фотопровідній плівці під час експозиції світловим полем. В області лунок, де інтенсивність експонуючого світлового поля мала мінімум і захоплений заряд не утворився, золоті кластери не осаджуються (див. рис. 4, *b* і рис. 5, *b*).

Напруженість електричного поля в цих областях оцінена із додат-

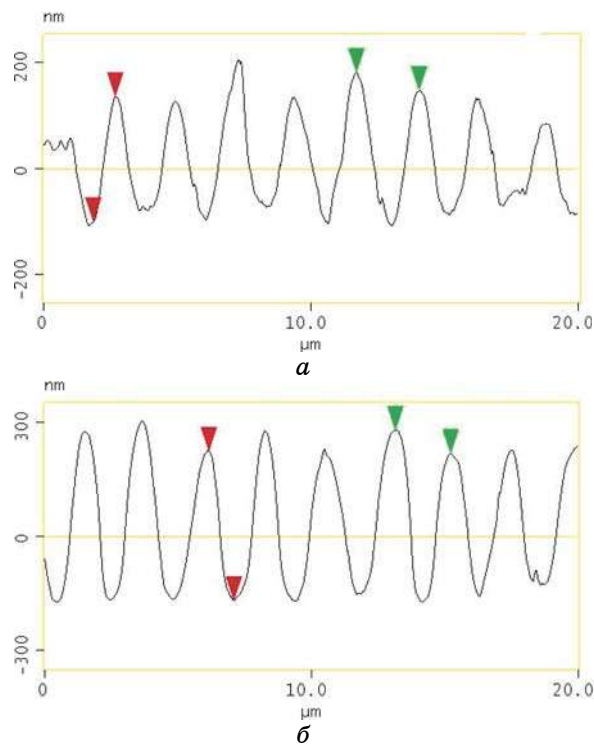


Рис. 5. Рельєф поверхні зразків полімерної плівки, одержаний методом АСМ. *a* — рельєф полімерної плівки після запису голограми; *б* — рельєф поверхні після нанесення золота на полімерну плівку.

кових експериментів за методикою [15] шляхом співставлення дифракційних ефективностей синусоїдальних рельєфів, сформованих у полі поверхневого та локалізованого об'ємного зарядів. Середнє значення потенціалу поверхні плівки в електретнім стані складало 6 В, а максимальний потенціал на її поверхні в припущенні синусоїдального розподілу досягав 12 В при товщині плівки 820 нм та періоді сформованої структури 2,1 мкм. Діелектрична проникність нанокompозиту оцінена як квадрат показника заломлення, типове значення якого для карбазолвмісних полімерів становить 1,4 [20]. Отже, напруженість електричного поля, локалізованого в товщині плівки, можна оцінити у 150 МВ/м, а поблизу її поверхні у 120 МВ/м. Використані для оцінки макроскопічні електростатичні уявлення не враховували атомарну будову центрів локалізації заряду, тому наведені дані є усередненими і можуть розглядатися як оцінка напруженості електричного поля знизу. Зазначені електричні поля порівнянні з внутрішньомолекулярними і, безумовно, можуть викликати значні поляризаційні ефекти у атомів, молекул та нанокластерів широкого класу сполук.

Можна припустити, що механізмом самовпорядкування золота під час термічного напорошення у вакуумі на поверхню темплату є рух атомів та кластерів молекулярного пучка золота в локальному електричному полі поблизу поверхні, тобто електрокінетичний ефект [27]. Виникнення у атомів золота дипольних моментів та відповідних сил, які втягують атоми та наночастинки в області градієнту електричного поля темплату під час напорошення сприяє транспорту атомів золота до областей поверхні де локалізовано заряд, в яких і відбуваються явища формування кластерів із пари.

Слід зазначити, що електрокінетичні явища спостерігаються як у вакуумі, так і в газах, рідинах, колоїдних розчинах та розплавах. В цих явищах можуть приймати участь як заряджені частинки (іони, кластери органічних сполук), електронейтральні частинки із статичним дипольним моментом (наприклад молекули органічних барвників, нейтральні кластери асиметричної будови), так і електронейтральні поляризовані зовнішнім електричним полем частинки (атоми металів, молекули органічних та неорганічних сполук, фуллерени, нанотрубки). Транспорт зарядженої або поляризованої частинки буде відбуватися у напрямку градієнту електричного поля за відсутності умов подолання частинкою потенціальної ями локалізованого заряду, при розсіянні молекулярного пучка, дифузії, міграції, теплових флуктуаціях. Тобто, функціоналізацію темплату можна проводити дуже широким колом неорганічних та органічних сполук у вакуумі, газовій або рідкій фазі.

У даному експерименті об'єм та розміри осаджених нанокластерів золота визначалися кількістю конденсованого на поверхні темплату золота, яка може варіюватися в межах від адсорбованого шару до кількох мікронів.

Найменший період сформованої голографічним методом структури становить чверть довжини хвилі при зустрічному розповсюдженні лазерних променів. Отже, у випадку використання лазерів, що випромінюють у короткохвильовій видимій та ближній ультрафіолетовій області, можливо одержати на поверхні темплату структури із періодом 80–100 нм. Напруженість електричного поля зростатиме пропорційно, що може викликати необхідність проводити процес осадження функціоналізуючої речовини виключно у вакуумі. Суттєва просторова нелінійність явищ формування локалізованого заряду та електрокінетичного транспорту може дозволити ще на порядок зменшити характерний розмір функціоналізованих областей на поверхні темплату за оптимальних умов та методик їх виготовлення.

4. ВИСНОВКИ

Запропоновано новий підхід до формування електретних темплатів у

електрофотографічним процесі та сформовано такий темплат площею $\sim 1 \text{ см}^2$ періодом біля 2 мкм електрофотографічним методом при експозиції плівки нанокompatитного фотопровідника голографією.

Показано, що розташування та симетрія осаджених на поверхню електретного темплату нанокластерів золота, одержаних напорошенням у вакуумі, задаються топологією світлового поля голограми, яке використане для формування темплату.

Запропоновано механізм самовпорядкування під час термічного напорошення у вакуумі на поверхню темплату, що полягає у електрорітмічному русі атомів або кластерів молекулярного пучка в локальному електричному полі поблизу поверхні та їх адсорбції на поверхні плівки із утворенням твердої фази. Напруженість електричного поля в областях осадження на поверхні темплату складала 120 МВ/м. На поверхню темплату можливе осадження широкого кола органічних та неорганічних сполук у вакуумі, із газової та рідкої фаз. Роздільна здатність такого методу виготовлення темплатів обмежується чвертю довжини хвилі експонуючого лазерного випромінювання.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. W. A. Goddard, D. W. Brenner, S. E. Lyshevski, and G. J. Iafrate, *Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology* (London–New York–Washington, D.C.: Boca-Raton: 2003).
2. Д. В. Солдатов, И. С. Теренова, *Журнал структурной химии*, **46**: 5 (2005).
3. D. V. Soldatov, *Encyclopaedia of Supramolecular Chemistry* (Eds. J. L. Atwood and J. W. Steed) (New York: Marcel Dekker: 2004), p. 1302.
4. Ю. Д. Третьяков, *Красная книга микроструктур новых функциональных материалов* (Москва: МГУ им. М. В. Ломоносова: 2006).
5. H. S. Nalwa, *Encyclopaedia of Nanoscience and Nanotechnology* (2004), vol. X, p. 1.
6. П. Г. Костюк, *Біофізика* (Київ: Обереги: 2001).
7. Jin Hyung, Kim Yonghan, and Roh Byungyou Hong, *J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, **24**, Iss. 4: 1327 (2006).
8. A. T. Woolley, *DNA Shadow Nanolithography: Small*, **3**, No. 9: 1534 (2007).
9. Э. Г. Раков, *Нанотрубки и фуллерены* (Москва: Логос: 2006).
10. В. Ю. Первак, А. П. Шпак, Ю. О. Первак, Л. Ю. Куницька, *Фізика фотонних кристалів* (Київ: Академперіодика: 2007).
11. A. Blaadren, R. Ruel, and P. Wiltzius, *Nature*, **385**: 321 (1997).
12. С. А. Бондаренко, Ю. Д. Третьяков, *Синтез фотонных кристаллов на основе латексных микросфер. Химия твердого тела и современные микро и нанотехнологии* (Кисловодск–Ставрополь: Севкавгту: 2006).
13. <http://www.physorg.com/news107775692.html>
14. J. Guan, B. Yu, and J. Lee, *Advanced Materials*, **19**: 1212 (2007).
15. Ю. М. Барабаш, Д. А. Гринько, М. А. Заболотный, Н. Г. Находкин и др., *Голографический способ исследования и контроля фотозлектретных свойств фототермопластических материалов на основе полимерных по-*

- лупроводников* (Авт. св. СССР №1089549 от 3.01.1984 г.).
16. М. Ю. Баженов, Ю. М. Барабаш, М. А. Заболотный, В. С. Сологуб, *Способ регистрации оптической информации на пленках полимерных полупроводников* (Авт. св. СССР №1529976 от 15.09.1989 г.).
 17. A. V. Goncharenko, D. A. Grynko, K. P. Grytsenko, and V. Z. Lozovsky, *J. of Nanosci. and Nanotechnol.*, **5**: 1 (2005).
 18. E. G. Bortchagovsky, *J. Appl. Phys.*, **95**: 5192 (2004).
 19. E. G. Bortchagovsky, J. Heimel, H. Fuchs, and U. C. Fischer, *J. Korean Phys. Soc.*, **47**: S48 (2005).
 20. И. А. Акимов, Ю. А. Черкасов, М. И. Черкашин, *Сенсибилизированный фотоэффект* (Москва: Наука: 1980).
 21. Е. Л. Александрова, *Физика и техника полупроводников*, **38**, 10: 1153 (2004).
 22. Д. О. Гринько, В. В. Курдюков, О. О. Мужичок, *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*, **40**: 195 (2005).
 23. А. Л. Кукла, Д. А. Гринько, А. С. Павлюченко, В. А. Котляр, Ю. М. Барабаш, *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*, **40**: 127 (2005).
 24. Ю. П. Гущо *Фазовая рельефография* (Москва: Энергия: 1974).
 25. С. Г. Гренишин, *Электрофотографический процесс* (Москва: Наука: 1970).
 26. Y. Varabash, M. Zabolotny, V. Kharkianen, and N. Sokolov, *Semiconductors physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, **5**, No. 3: 58 (2002).
 27. А. П. Шпак, П. Г. Черемской, Ю. А. Куницкий, О. В. Соболев, *Кластерные и наноструктурные материалы* (Киев: Академперіодика: 2005), т. 3.