

УДК 004.085

**В. В. Петров<sup>1</sup>, П. М. Литвин<sup>2</sup>, М. А. Трунов<sup>1</sup>, А. А. Крючин<sup>1</sup>,  
Є. В. Беляк<sup>1</sup>, В. М. Рубіш<sup>1</sup>, С. О. Костюкевич<sup>2</sup>, А. А. Коштюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут проблем реєстрації інформації НАН України  
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

e-mail: petrov@ipri.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова  
просп. Науки, 41, 03028 Київ, Україна

e-mail: skostyukevych@gmail.com

## **Методи формування нанорозмірних структур на плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників**

*Представлено аналіз методів запису мікро- та нанорельєфних структур на плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників. Показано, що при експонуванні плівок халькогенідних склоподібних напівпровідників оптичним випромінюванням, яке сфокусовано дифракційно обмеженими оптичними системами, відбитки, розміри яких значно менші дифракційної межі, можуть бути отримані при використанні нелінійності експозиційної характеристики фоточутливих матеріалів. Наведено дані про запис нанорозмірних структур ближньопольовими та електронно-променевими фокусувальними системами.*

**Ключові слова:** нанорельєфні структури, халькогенідні склоподібні напівпровідники ближньопольові зонди, атомно-силова літографія.

### **Вступ**

Чисельні теоретичні та експериментальні дослідження у халькогенідних склоподібних напівпровідниках (ХСН) показали можливість досягнення надвисокої роздільної здатності при їхньому експонуванні оптичним випромінюванням або електронним променем [1–4]. Показано, що роздільна здатність неорганічного резисту на основі ХСН визначається розмірами структурних одиниць, які формують матрицю плівок, і становлять 1–2 нм [1–3]. У зв'язку з цим халькогенідні склоподібні напівпровідники є перспективними матеріалами для формування на їхні поверхні нанорозмірних структур і створення пристроїв надщільного запису інформації [4].

© В. В. Петров, П. М. Литвин, М. А. Трунов, А. А. Крючин,  
Є. В. Беляк, В. М. Рубіш, С. О. Костюкевич, А. А. Коштюк

Перші експерименти з експонування тонких плівок халькогенідних склоподібних напівпровідників, нанесених на плівки срібла, та наступного їхнього селективного хімічного травлення показали, що при використанні імерсійних оптичних систем можливо записувати мікрорельєфні структури з субмікронними розмірами (0,12–0,15 мкм). При електронно-променевому експонуванні плівок ХСН з'являється можливість формування структур з розмірами 50–70 нм [5].

Рельєфні структури на плівках халькогенідних напівпровідників, ширина яких менше роздільної здатності дифракційно обмеженої оптики, можна створювати із використанням режиму термолітографічного запису. Локальне нагрівання плівки в зоні запису випромінюванням з неоднорідним розподілом інтенсивності дозволяє зменшувати розмір відбитків до необхідного значення за рахунок вибору режиму запису [6, 7]. Створенню мікро- та нанорельєфних структур сфокусованим лазерним випромінюванням на плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників сприяє нелінійність експозиційної характеристики, що пов'язана з локальним нагрівом у зоні запису та генерацією великої кількості електронно-діркових пар. Ефект збільшення фоточутливості плівок ХСН у процесі імпульсного опромінення спостерігався багатьма дослідниками [6, 8–11]. Наприклад, у [11] було встановлено, що фоточутливість плівок AsSe при їхньому експонуванні оптичними імпульсами тривалістю 7 нс у 500 разів більша, ніж при експонуванні неперервним випромінюванням. Використання фоторезистів на основі ХСН дозволяє здійснювати запис рельєфних зображень з шириною елементів 0,3–0,8 мкм випромінюванням з довжиною хвилі 405 нм [7]. Технологія формування елементів з такими розмірами представляє значний інтерес для систем запису оптичних дисків у форматах CD, DVD, BD [12] та створенню дифракційних ґраток [13], однак, не задовольняє вимогам запису даних на високоємних носіях наступних поколінь. Створення методів формування нанорозмірних рельєфних структур на тонких плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників представляє актуальну задачу.

### **Використання ближньопольових зондів для експонування тонких плівок халькогенідних склоподібних напівпровідників**

Для зменшення діаметра експонувального променя за дифракційну межу з використанням ближньопольових зондів пропонувалося багато технічних рішень, у тому числі фокусування експонувального випромінювання через діафрагму, створену в матеріалі з нелінійною експозиційною характеристикою (технологія Super-RENS). Схему методу запису Super-RENS наведено на рис. 1 [14].

У [15] як матеріал діафрагми запропоновано використати тонкі плівки сурми (Sb) товщиною 20 нм, які розміщені між захисними плівками  $(\text{ZnS})_{0,85}(\text{SiO}_2)_{0,15}$  товщиною 130 нм і 100 нм відповідно [15]. Така технологія запису дозволила на плівках GeSbTe (GST) одержати відбитки з лінійними розмірами близько 100 нм [15].

В альтернативній конструкції Super-RENS замість шару Sb використовується шар оксидів благородних металів ( $\text{AgO}_x$ ,  $\text{PtO}_x$  та  $\text{PdO}_x$ ). Опромінення оксидного шару викликає розкладання оксиду і формування шару наночастинок металу. Поверхневі плазмони, збуджені світлом у цих наночастинках, генерують оптичне

ближньопольове випромінювання. Цю технічну конструкцію зазвичай називають розсіювальним типом Super-RENS [16]. Технологія збудження металічних наночастинок і використання оптичного ближньопольового випромінювання для експонування фоточутливих шарів виявилася досить ефективною для формування нанорозмірних структур [17, 18]. Зчитування записаних нанорозмірних відбитків може здійснюватися ближньопольовими зондами [4, 14].

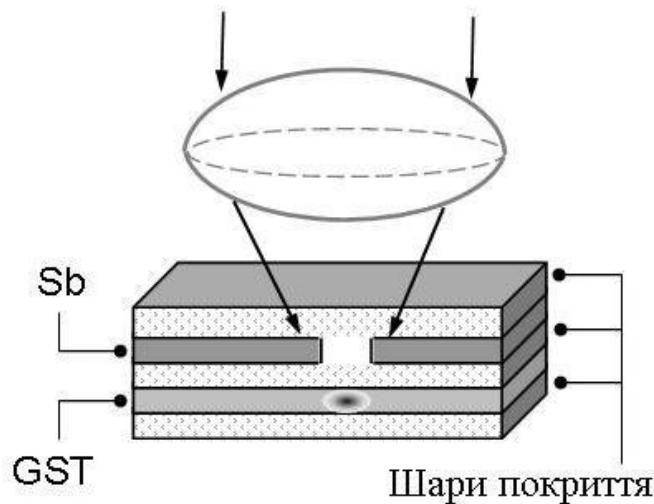


Рис. 1. Отримання нанорозмірних відбитків на плівці халькогенідного напівпровідника за технологією Super-RENS [14]

Використання спеціальних ближньопольових зондів відкриває значно більші можливості для отримання нанорозмірних рельєфних структур на плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників [11, 19, 20]. Уже в перших роботах з експонування плівок ХСН ближньопольовими зондами було показано можливість формування нанорозмірних структур. На плівках AsSe оптичним зондом з апертурою 100 нм були записані лінії шириною 125 нм [11]. Експонування здійснювалося неперервним випромінюванням аргонного лазера зі щільністю потужності  $1 \text{ Вт/мм}^2$  з послідовним проходженням зони експонування. Час проходження зони експонування довжиною 7 мкм становив 0,9 с. Опромінення малими дозами призводило до фотопотемніння плівки. При збільшенні експозиції до 60 с починались абляційні процеси [11]. На рис. 2 наведені зображення поверхні плівки AsSe до опромінення (2,а) та після опромінення різними дозами експонувального випромінювання (2,б — час експонування 20 с; 2,в — час експонування 60 с). На цьому ж рисунку наведені 3D-зображення (2,г) і відповідний переріз поверхні плівки (2,д), що опромінювалася протягом 60 с.

Використання фотоіндукованих ефектів у літографічному процесі має значні обмеження при створенні нанорельєфних структур. Тому дослідженню цих ефектів у плівках при їхньому ближньопольовому експонуванні приділяється значна увага. Одна з головних проблем при проведенні експериментів із запису ближньопольовим зондом пов'язана з необхідністю дотримання нанометрової відстані між фокусувальним зондом і поверхнею плівки фоточутливого матеріалу. Як пра-

вило, зонд розміщується на п'єзоелектричному перетворювачі, переміщення якого керується системою зі зворотнім зв'язком.

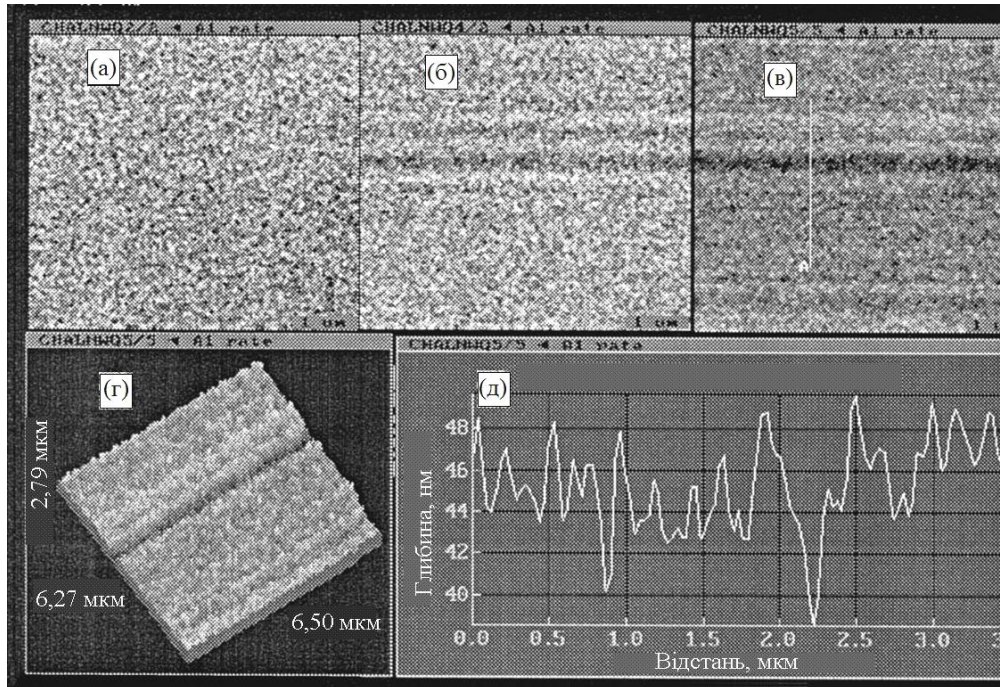


Рис. 2. Зображення поверхні плівки AsSe: а) до опромінення; б) та в) після опромінення різними дозами експонування випромінювання; г) 3D-зображення; д) переріз поверхні плівки [11]

Для вирішення технічної проблеми, що пов'язана з розміщенням зонду на визначеній відстані від fotocутливого матеріалу та точним експонуванням, ближньопольовий освітлювач розміщується на зонді атомно-силового мікроскопу (АСМ), що дозволяє з точністю до кількох нанометрів підтримувати відстань до поверхні fotocутливого матеріалу [19, 20]. Методика використання АСМ для розміщення конічних оптичних волокон, які виступають як ближньопольові оптичні джерела, дозволяє здійснювати запис структур нанометрового масштабу. При використанні у літографічному процесі виготовлення нанорозмірних елементів у АСМ звичайна піраміда замінюється «системою», що призначена для фокусування оптичного випромінювання на стадії експонування.

У [20] наведено дані про нанорозмірні періодичні структури, записані ближньопольовим зондом на плівці сульфиду миш'яку ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ). Плівка використовувалась як позитивний резист, селективне травлення якого здійснювалося 40-процентним водним розчином монометиламіну. Швидкість експонування становила близько 100 мкм/с. Ближньопольовим зондом з апертурою 120 нм було записано лінії шириною 100 нм і глибиною 23 нм (рис. 3). Запис здійснено на ділянці  $200 \times 200$  мкм [20]. Шорсткість плівки  $\text{As}_2\text{S}_3$  після селективного травлення залишилася такою ж, як і у вихідній плівки і не вплинула на процес формування зображення. Оскільки шорсткість фоторезисту у 30–50 разів менша, ніж роздільна здатність виготовленої ґратки, цей параметр не накладає обмежень на роздільну

здатність процесу. Основним недоліком використаного способу є низька швидкість сканування (100 мкм/с), що пояснюється низькою ефективністю ближньопольових зондів на базі конічних світловодів [20]. Ближньопольова нанолітографія на плівках халькогенідів може бути більш ефективною при експонуванні їхніми інтенсивними короткими світловими імпульсами з урахуванням ефекту значного збільшення фоточутливості фоторезистів [20].

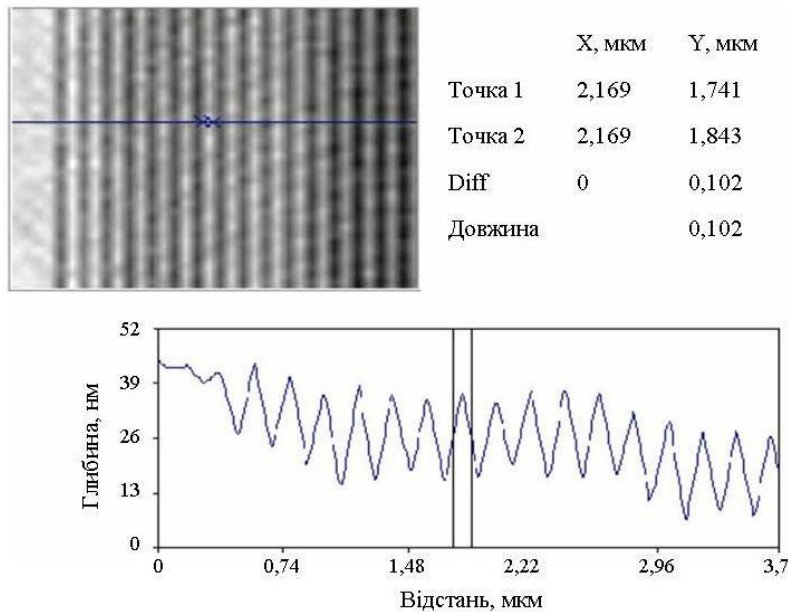


Рис. 3. Періодична структура на плівці  $\text{As}_2\text{S}_3$ , записана ближньопольовим зондом після селективного травлення [19]

Одним зі шляхів подолання дифракційної межі може бути використання ближнього світлового поля наночастинок (НЧ) металів, інтегрованих з тонкою плівкою ХСН, тобто формування своерідних плазмонних наноструктур [17, 18]. Генерація локалізованих плазмонів у НЧ благородних металів широко використовується для підвищення взаємодії світла з матрицею, яка оточує ці плазмонні наноструктури. Падаюче світло поглинається наночастинками і перетворюється в колективні коливання вільних електронів у ансамблі НЧ, що призводить до різкого посилення локального електричного поля. Це явище, назване поверхневим плазмонним резонансом (ППР), виникає в НЧ благородних металів у видимій області спектра і може розглядатись як генерація затухаючих фотонів у області ближнього поля. Відповідно, локальні (нанометрові) області матриці плівки, яка покриває наночастинки, повинні збуджуватися через генерацію носіїв у разі, якщо довжина хвилі ППР знаходиться в спектральному діапазоні краю поглинання халькогенідної плівки. Відомо також, що генерування електронно-діркових пар при збудженні забороненої зони є загальною складовою механізму процесів мас-транспорту в халькогенідних плівках [21, 22]. Локальне електричне підсилення поля призводить до значного підвищення ефективності мас-транспорту речовини плівки на нанорівні [17, 18]. За рахунок інтерференції світлового поля таких плазмонів і

зміни довжини хвилі або поляризації падаючого світла можуть бути сформовані значно складніші рельєфи поверхні, ніж за допомогою звичайної інтерференційної літографії.

### **Формування нанорозмірних рельєфних структур на плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників методами зондової мікроскопії**

У плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників структурні перетворення відбуваються також при їхньому електронно-променевому опроміненні, що дає можливість формувати структури нанометрового масштабу. Халькогенідні стекла, як правило, розчиняються в лужних розчинниках, однак, після опромінення електронами високої енергії (30 кеВ) стають більш стійкими до травників на основі амінів [2, 3]. Дослідження показали [2, 3], що на резистах As-S, можна досягти роздільної здатності краще ніж 20 нм. При запису електронним променем діаметром 1 нм була отримана періодична структура з ліній шириною 30 нм і проміжків між ними ~15 нм. Значно більша ширина записаних ліній порівняно з діаметром експонувального променя пов'язана з розсіянням вторинних електронів. У плівках сульфиду миш'яку були створені структури з шириною ліній 27 нм, проміжками 7 нм і висотою від 80 до 250 нм [3]. Розроблено декілька способів здійснення ефективного електронно-променевого опромінення неорганічних резистів, у тому числі з використанням атомно-силової мікроскопії (АСМ).

Можливість використання сканувальних зондових мікроскопів (СЗМ) для проведення маніпуляцій атомами та нанорозмірної модифікації матеріалів було виявлено відразу після винаходу сканувального тунельного мікроскопу (СТМ) [23–26]. Існує декілька основних механізмів модифікації поверхні досліджуваного зразка за допомогою зонду СЗМ: електричний, тепловий, механічний, хімічний, а також різні комбінації між ними. До переваг методу сканувальної зондової літографії слід віднести:

- відсутність масок, резистів, хімічного травлення;
- високу локальність взаємодії з поверхнею підкладки;
- відносну дешевизну устаткування.

Основним недоліком сканувальної зондової літографії (СЗЛ) на сьогоднішній день є низька швидкість процесу літографії і, таким чином, обмежена область завдань, що вирішуються за допомогою даної методики. Необхідно відзначити, що в області наноконтакту відбувається концентрація струмів великої щільності, високих електричних полів і механічних тисків. Роздільна або спільна дія цих чинників активізує низку фізико-хімічних явищ (локальне розігрівання, пластичну деформацію, поляризацію, польове випаровування, мас-транспорт, електрохімічні реакції), які використовуються для наномодифікації матеріалів у різних режимах роботи СЗЛ [23, 24]. Сканувальний тунельний мікроскоп та атомно-силовий мікроскоп можуть використовуватися не тільки для аналізу поверхні, але і для модифікації поверхні на атомному рівні. Використання АСМ дозволяє усунути проблему точного керування відстані між зондом і носієм та дозволяє досліджувати матеріали з різною електропровідністю. Переваги сканувальної атомно-силової мікроскопії полягають у можливості здійснення прямого запису, виготовлення

періодичних і неперіодичних структур на підкладках різної природи, простоті та економічності [23, 25]. Атомно-силовий мікроскоп може використовуватися для надщільного запису даних зі швидкостями сканування до 100 мм/с.

Важливе значення для створення нанорельєфних структур з визначеними властивостями має вибір матеріалу, на якому створюються такі структури. В [27] запропоновано здійснювати процес СЗЛ на двошаровій структурі. Перший шар виконано з м'якого матеріалу товщиною 10–15 нм. У ньому за стандартною технологією атомно-силової літографії формується періодична нанорельєфна структура [25, 26]. Другий шар виконано з халькогенідного резисту, і він має товщину, що необхідна для створення літографічної маски. Крізь одержану періодичну структуру здійснюється селективне травлення шару неорганічного резисту. Зображення нанорозмірних рельєфних структур наведено на рис. 4. Запропонована в [27] технологія дозволяє отримувати лінії шириною 60 нм.

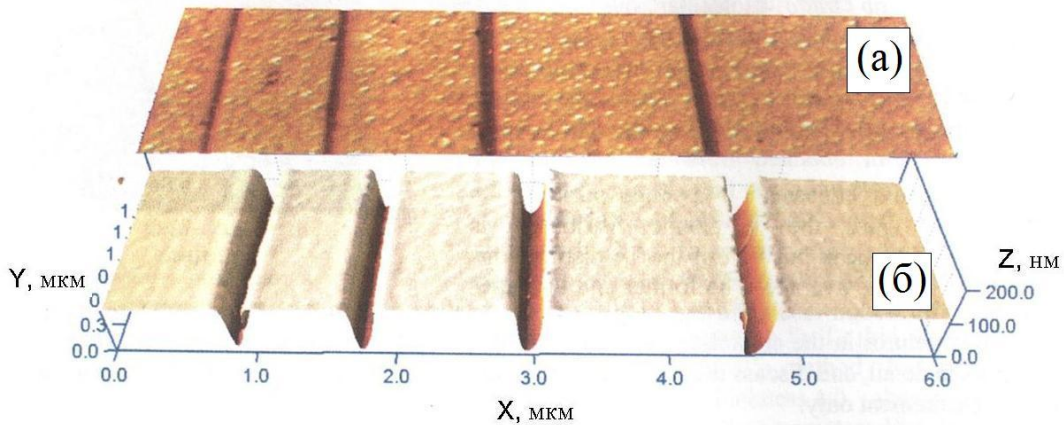


Рис. 4. 3D АСМ-зображення ліній, що отримані: а) механічною деформацією неорганічного резисту; б) селективним хімічним травленням двошарового резисту [28]

Із використанням технології атомно-силової мікроскопії успішно проводився запис даних та формування нанорозмірних структур на плівках ХСН з фазовими перетвореннями [24]. Запис інформації базується на формуванні за допомогою електричного імпульсу в нанорозмірному шарі халькогенідного матеріалу локальних ділянок (кристалічних/аморфних) з відмінними структурою і, відповідно, електропровідністю. Схему процесу запису наведено на рис. 5 [24]. Було показано, що за рахунок прикладення імпульсів напруги між зондом і провідним електродом провідність халькогенідної аморфної плівки  $\text{GeSb}_2\text{Te}_4$  зростає більше, ніж на 2 порядки. Зростання провідності обумовлено фазовим переходом халькогенідної плівки з аморфного стану в кристалічний. Записані дані зчитуються зондом АСМ шляхом визначення зміни провідності халькогенідної плівки. Одночасне вимірювання провідності і топографічних зображень за допомогою АСМ показало, що рельєф поверхні записаних зон не змінився у процесі запису. Найменші записані відбитки були до 10 нм у діаметрі, що відповідає щільності запису даних у 1 Тбіт/см<sup>2</sup> [24].

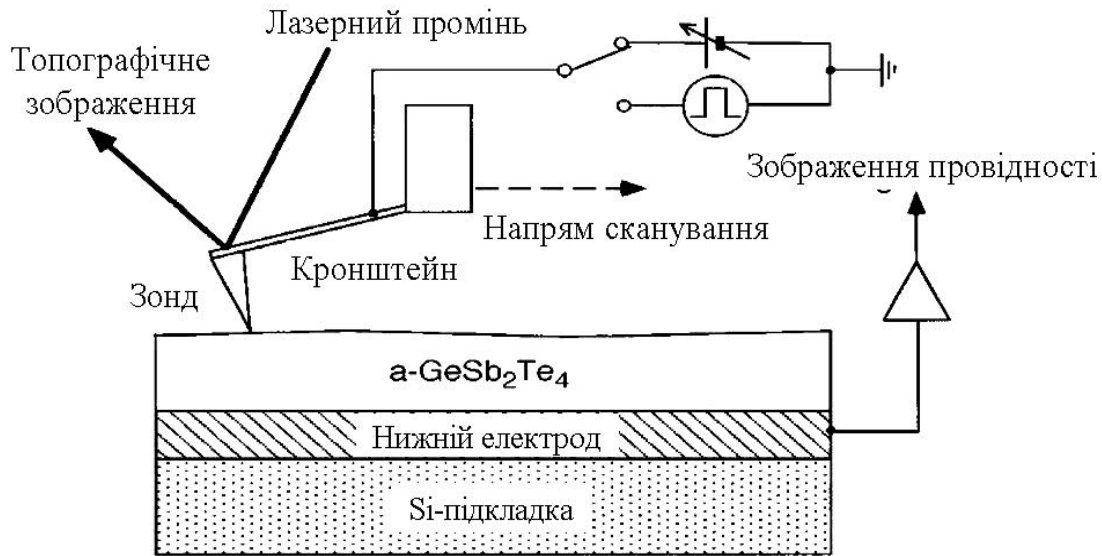


Рис. 5. Схема процесу фазового запису атомно-силовим мікроскопом на плівках халькогенідних напівпровідників [24]

Формування нанорозмірних рельєфних структур у плівках ХСН може здійснюватися шляхом спільного використання методів оптичної мікроскопії та зондової нанолітографії. Під впливом сфокусованого лазерного випромінювання відбувається фоторозм'якшення матеріалу в зоні фокусування за рахунок фотопластичного ефекту. Мінімальний розмір модифікованої поверхні (зони запису) визначається в основному радіусом кривизни нано голки для наноіндентування [28]. Використання такої технології запису дозволяє досягти формування елементів з розмірами зони запису  $\sim 30\text{--}70$  нм, що у 3–5 разів менше, ніж реальний діаметр сфокусованого експонувального променя лазерних джерел фіолетового та ультрафіолетового випромінювання.

Одержання відповідного рельєфу у зоні запису відбувається безпосередньо під час одночасного експонування та індентування, що є суттєвою перевагою перед відомими літографічними методами, які потребують додаткової обробки носія хімічними розчинниками селективної дії, іонно-променевим або плазмохімічним травленням. Профілі відбитків, одержаних при наноіндентуванні плівки  $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$  в темноті та під засвіткою при різних навантаженнях наведено на рис. 6. Зважаючи на досягнення найближчого з аналогів — технології Millipede (IBM), запропонований метод можна розглядати як один із найбільш перспективних для надщільного запису. Однією з переваг даного методу є відсутність джерела термічного нагрівання для розм'якшення ділянки поверхні, що модифікується, та, відповідно, пов'язаних із цим нагріванням недоліків (енергетичних затрат, складності мікро-механічної системи, навантаження та інше).



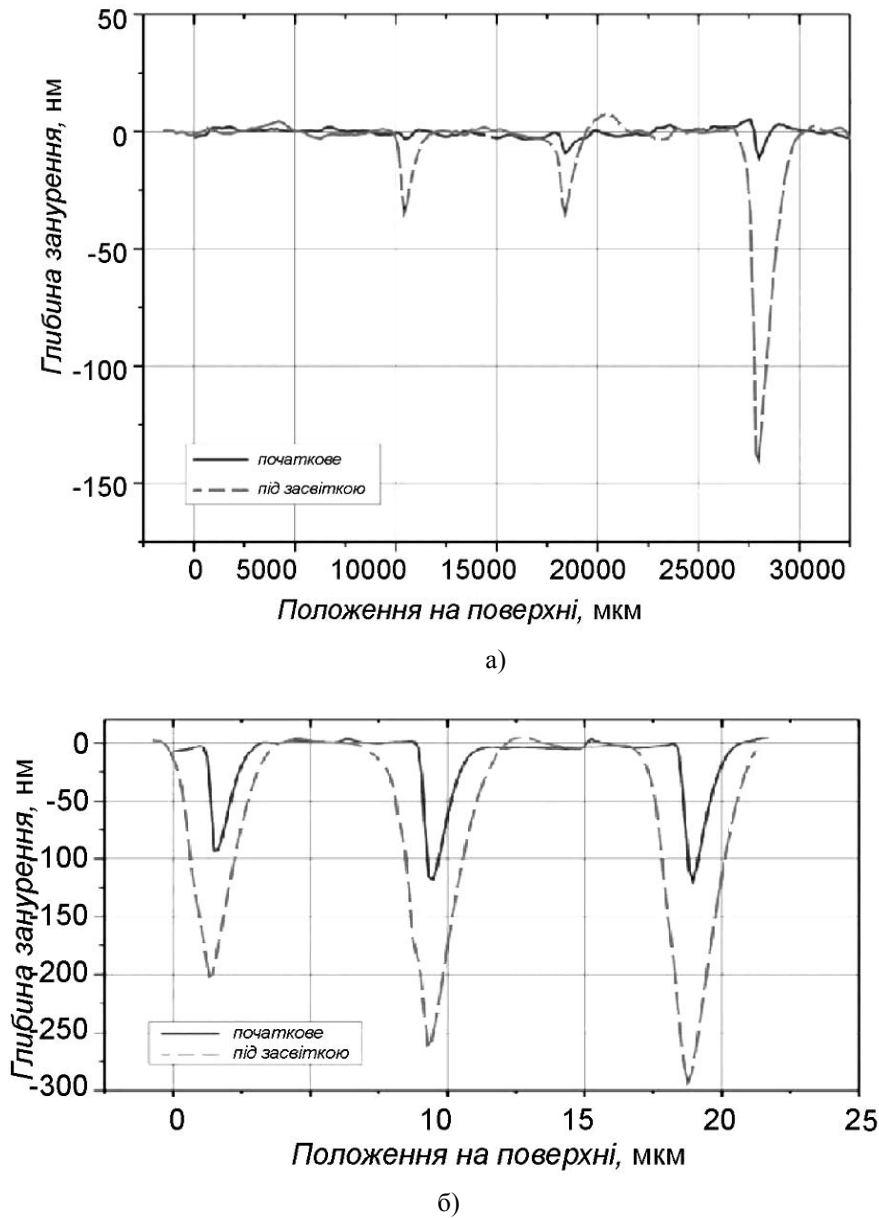


Рис. 6. Профілі відбитків, одержаних при nanoідентуванні плівки  $As_{20}Se_{80}$  в темноті та під засвіткою при навантаженнях: а) 120–240  $\mu N$ ; б) 700–900  $\mu N$  [27]

## Висновки

1. Розроблені технології ближньопольового запису дозволяють створювати на плівках ХСН рельєфні наноструктури з розмірами десятки нанометрів, однак мала ефективність ближньопольових зондів не дозволяє досягати швидкостей створення зображень, які б змогли знайти практичне застосування.

2. Значно більшими можливостями для формування нанорозмірних структур на плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників володіють електронно-променеві методи експонування, включаючи запис на атомно-силовому мікроскопі.

3. Перспективним і ефективним є метод формування структур нанометрового масштабу за допомогою електричного імпульсу в шарі халькогенідного матеріалу з фазовими перетвореннями, який дозволяє одержувати відбитки розміром до 10 нм у діаметрі, що відповідає щільності запису в 1 Тбіт/см<sup>2</sup>.

4. Серед оптичних методів формування нанорозмірних структур представляє інтерес метод, в якому використовується ближнє світлове поле наночастинок благородних металів, інтегрованих з тонкою плівкою ХСН.

5. Перспективним методом формування нанорозмірних структур у плівках ХСН є оптомеханічний метод, який базується на фотопластичному ефекті. Одержання нанорозмірних елементів (30–70 нм) у зоні запису відбувається під час одночасного експонування та індентування поверхні плівки.

## Подяки

Автори висловлюють глибоку подяку співробітникам Інститутів проблем реєстрації інформації НАН України та фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України за допомогу у виготовленні зразків носіїв інформації, здійсненні запису інформації та їхньої подальшої обробки, а також за плідне обговорення результатів досліджень.

1. *Formation of surface structures on amorphous chalcogenide films* / S. Kokenyesi, I. Ivan, V. Takats [et al.] // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 2007. — Vol. 353. — P. 1470–1473.

2. *Vlcek M. Nanostructuring of chalcogenide glasses using electron lithography* / M. Vlcek, H. Jain // *J. of Optoelectronics and Advanced Materials*. — 2006. — Vol. 8, N 6. — P. 2108–2111.

3. *Fabrication of nano-gratings in arsenic sulphide films* / J.R. Neilson, A. Kovalskiy, M. Vlcek, [et al.] // *J. of Non-Crystalline Solids*. — 2007. — Vol. 353, Issue. 13–15. — P. 1427–14302.

4. *Kolobov A.V. Chalcogenide glasses in optical recording: recent progress* / A.V. Kolobov, J. Tomimaga // *J. of Optoelectronics and Advanced Materials*. — 2002. — Vol. 4, N 3. — P. 679–686

5. *Неорганічна фотолітографія. Монографія* / [Петров В.В., Крючин А.А., Костюкевич С.О., Рубіш В.М.] / Нац. акад. наук України, Ін-т проблем реєстрації інформації, Ін-т фізики напівпровідників. — К.: ІМФ НАНУ, 2007. — 195 с.

6. *Крючин А.А. Влияние нелинейности регистрирующей среды на плотность записи информации в оптических запоминающих устройствах* / А.А. Крючин, В.В. Петров // *Квантовая электроника*. — 1997. — Т. 4, № 1. — С. 188–190.

7. *Крючин А.А. Анализ методов получения наноразмерных рельефных структур на поверхности носителей информации* / А.А. Крючин, С.А. Костюкевич // *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. — 2010. — Т. 12, № 1. — С. 3–11.

8. *Петров В.В. О светочувствительности систем на основе стеклообразных халькогенидных полупроводников при высокой мощности облучения* / В.В. Петров, А.А. Крючин // *Квантовая электроника*. — 1974. — Т. 1, № 12. — С. 2618–2620.

9. *Костышин М.Т. Поведение светочувствительной системы Ag-As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> при облучении импульсным лазерным излучением большой мощности* / М.Т. Костышин, С.А. Костюкевич // *Укр. физ. журн.* — 1981. — Т. 26, № 9. — С. 1561–1563.

10. *Калитеевская Н.А. Эффект усиления контраста передачи изображения при взаимодействии ультрафиолетового излучения с пленками неорганических фоторезистов* / Н.А. Калитеевская, Р.П. Сейсян // *Физ. и техн. полупроводников* — 2001. — Т. 35, № 2. — С. 233–236.

11. *Sub-wavelength* optical recording on chalcogenide glassy film / Y. Isbi, S. Sternklar, E. Granot [et al.] // Optics communications. — 1999. — Vol. 171, N 4/6. — P. 219–223.
12. *Надцильний* оптичний запис інформації / [Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М. та ін.]: відп. ред. О.Г. Додонов. — Національна академія наук України, Інститут проблем реєстрації інформації. — К.: НАН України, 2009. — 282 с. — ISBN 978-966-02-5027-7.
13. *Indutniy I.Z.* Laser lithography in the layers As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> / I.Z. Indutniy, S.A. Kostyukevich, V.I. Minko // Optoelectron and Semicond. Engin, —1993. — Vol. 25. — P. 52–59.
14. *Optical* switching properties of light –induced pinhole in antimony thin films / T. Fukaya, J. Tominaga, T. Nakano, N. Atoda // Appl. Phys. Lett. — 1999. — Vol. 75. — P. 3114–3116 .
15. *Non-melting* super-resolution near-field apertures in Sb-Te alloys / R.E. Simpson, P. Fons, X. Wang [et al.] // Appl. Phys. Lett. — 2010. — Vol. 97. — P. 161906.
16. *Optical* Properties of Metal-Oxide Films in Super-RENS / Q. Liu, T. Fukaya, J. Tominaga [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. — 2005. — Vol. 44. — Part 1. — N. 7A. — P. 5156–5163.
17. *Light-induced* mass transport in amorphous chalcogenides/gold nanoparticles composites / M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, P.M. Nagy [et al.] // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. — 2013. — Vol. 16, N 4. — P. 354–361.
18. *Light-induced* mass transport in amorphous chalcogenides: Toward surface plasmon-assisted nanolithography and near-field nanoimaging / M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, P.M. Nagy [et al.] // Phys. Status Solidi B. — 2014. — **251**, N 7. — P. 1354–1362.
19. *Thermal* and optical nanolithography using a scanning near-field optical microscopy / E. Flaexer, M. Klebanov, V. Lyubin [et al.] / Microscopy: Science, Technology, Applications and Education A. Mendez-Vilas and J. Diaz (Eds). — FORMATEX, 2010. — P. 2103–2110.
20. *Optical* near-field lithography in halcogenidefilms / S. Noach, M. Manevich, N.P. Eisenberg [et al.] //Optical Materials. — 2006. — Vol. 28. — P. 1054–1057.
21. *Real-time* atomic force microscopy imaging of photoinduced surface deformation in As<sub>x</sub>Se<sub>100-x</sub>As<sub>x</sub>Se<sub>100-x</sub> chalcogenide films / M.L. Trunov, P.M. Lytvyn, P.M. Nagy, O.M. Dyachyn's'ka // Appl. Phys. Lett. — 2010. — Vol. 96. — 111908.
22. *Kaganovskii Yu.* Inversion of the direction of photo-induced mass transport in As<sub>20</sub>Se<sub>80</sub> films: Experiment and theory / Yu. Kaganovskii, D.L. Beke, S. Charnovych [et al.] // J. Appl. Phys. — 2011. — **110**. — P. 063502 (5).
23. *Методи* нанолітографії / [Петров В.В., Крючин А.А., Куницкий Ю.А. та ін.]. — К.: Наук. думка, 2015. — 262 с.
24. *Kado H.* Nanometer-scale recording on chalcogenide films with an atomic force microscope / H. Kado, T. Tonda // Appl. Phys. Lett. — 1995. — Vol. 66. — P. 2961–2962.
25. *Bhushan B.* Nanotribology and nanomechanics of AFM probe-based data recording technology / B. Bhushan, K. J. Kwak, M. Palacio J. // Phys.: Condens. Matter. — 2008. — Vol. 20, N 36. — 365207.
26. *Atomic* force microscopy lithography as a nanodevice development technique / A. Notargiacomo, V. Foglietti, E. Cianci [et al.] // Nanotechnology. — 1999. — Vol. 10, N 4. — P. 458–463.
27. *Scanning* probe nano-patterning on chalcogenide resists / I.Z. Indutniy P.M. Lytvyn, V.I. Min'ko [et al.] // Abstract Book 7-th Internation. Conf. on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides Cluj-Napoca, June 5–10, 2015. — P. 16
28. *Trunov M.L.* Photoplastic effect in non-crystalline materials: a nanoindentation study / M.L. Trunov // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2008. — Vol. 41, N 7. — 074011

Надійшла до редакції 02.02.2016