

УДК 004.085; 539.219.1; 548.213.2; 548.53
PACS 61.43.Fs; 61.46.+w; 78.30.-j

**В. В. Петров¹, А. А. Крючин¹, В. М. Рубіш¹,
С. А. Костюкевич², П. Є. Шепелявий²**

¹Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113, Київ, Україна
e-mail: kryuchyn@gmail.com

²Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова
Проспект Науки, 41, 03028, Київ, Україна
e-mail: skostyukevych@gmail.com

Використання халькогенідних склоподібних напівпровідників для створення мікро- та нанорозмірних структур

Представлено результати аналізу методів формування мікро- та нанорозмірних елементів на тонких плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників, що базуються на численних експериментальних даних, і визначено можливості їхнього застосування для створення оптичних дифракційних елементів.

Ключові слова: наноструктури, халькогенідні склоподібні напівпровідники, неорганічні резисти, плазмони, ближнє поле.

Вступ

При створенні мікро- та наноелементів оптоелектронних пристроїв, мікро- та наноелектромеханічних систем (MEMS/NEMS) і дифракційних оптичних елементів можуть ефективно використовуватися неорганічні резисти на основі плівок халькогенідних склоподібних напівпровідників (ХСН). Застосування цих матеріалів засновано, в основному, на їхній чутливості до різних видів опромінення, які викликають фазові та структурні зміни в плівках ХСН, і прозорості в інфрачервоному діапазоні [1–4]. Були проведені численні дослідження, що спрямовані на вивчення процесів формування наноструктур на плівках ХСН [2, 4–6]. У ХСН спостерігається цілий ряд фотоіндукованих змін, які пов'язані зі структурними перетвореннями, фазовими переходами, утворенням дефектів і дифузією атомів [1–3]. Важливим є визначення технологій формування мікро- та нанорозмірних структур на плівках ХСН, які можуть бути використані при створенні дифракційних оптичних елементів для оптоелектронних пристроїв.

© В. В. Петров, А. А. Крючин, В. М. Рубіш, С. А. Костюкевич, П. Є. Шепелявий

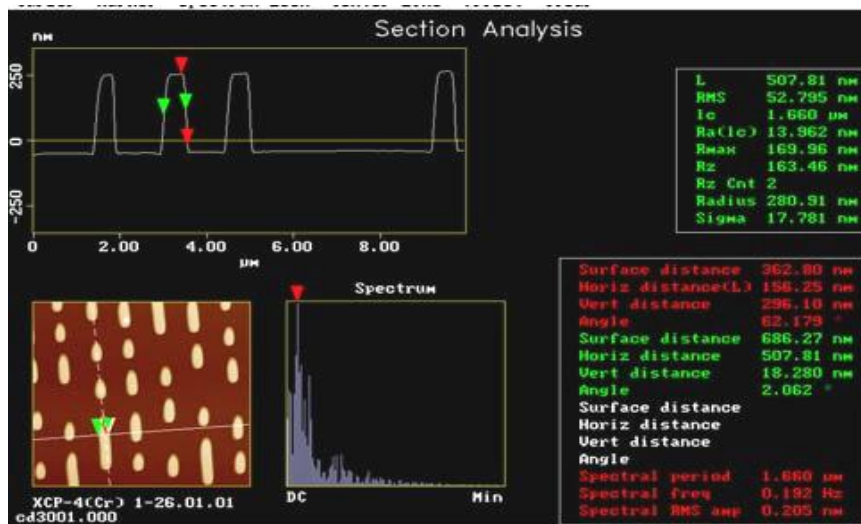
Формування мікро- та нанорозмірних рельєфних структур на плівках халькогенідних напівпровідників

Фотоіндуковані перетворення в ХСН знайшли широке застосування в оптичному записі інформації для створення оптичних носіїв різних типів. Це багато в чому пов'язано з тим, що властивості тонких халькогенідних плівок дозволяють проводити запис з високою швидкістю та не накладають обмежень на мінімальний розмір записуваних елементів і, як наслідок, на щільність запису інформації [2, 7]. Численні теоретичні та експериментальні дослідження процесів взаємодії електромагнітного випромінювання і потоків частинок з халькогенідними склоподібними напівпровідниками показали можливість досягнення надвисокої роздільної здатності при їхньому експонуванні оптичним випромінюванням або електронним променем [5, 6, 8, 9]. Показано, що роздільна здатність неорганічного резисту на основі ХСН визначається розмірами структурних одиниць, які формують матрицю плівок, і становить 1–2 нм [5, 8, 9]. У зв'язку з цим халькогенідні склоподібні напівпровідники є перспективними матеріалами для формування на їхній поверхні нанорозмірних структур і створення пристроїв надщільного запису інформації [10].

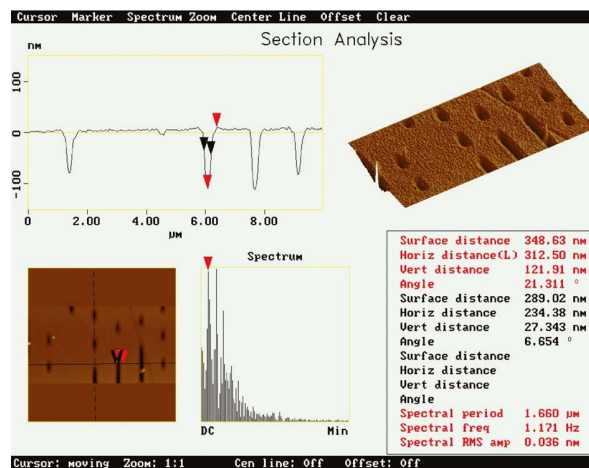
Численні експерименти з експонування тонких плівок ХСН і подальшого їхнього селективного хімічного травлення показали, що при використанні імерсійних оптичних систем можливо записувати мікрорельєфні структури із субмікронними розмірами (120–150 нм). При електронно-променевому експонуванні халькогенідних плівок з'являється можливість формування структур з розмірами 50–70 нм [2, 10]. Особлива увага приділялася вибору халькогенідних склоподібних напівпровідників, що не містять високотоксичних елементів, режимів їхньої термічної обробки та селективного хімічного травлення [11]. Типові зображення мікрорельєфних структур, що отримані на неорганічних резистах різних типів на базі тонких плівок халькогенідних склоподібних напівпровідників, представлені на рис. 1 (а, б).

Розмір елементів, що формуються при цьому на плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників визначався в основному роздільною здатністю оптичної фокусуєної системи та точністю роботи системи автоматичного фокусування. Проведений раніше аналіз показав, що мікрорельєфні структури на плівках ХСН, ширина яких менше роздільної здатності дифракційно обмеженої оптики, можна створювати з використанням режиму термолітографічного запису. Локальне нагрівання плівки в зоні запису випромінюванням з неоднорідним розподілом інтенсивності дозволяє зменшувати розмір відбитків за рахунок вибору режиму запису [2, 10, 13]. Створенню мікро- та нанорельєфних структур сфокусованим лазерним випромінюванням на плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників сприяє нелінійність експозиційної характеристики, пов'язаної з локальним нагріванням матеріалу в зоні запису і генерацією великої кількості електронно-діркових пар. Ефект збільшення фоточутливості плівок ХСН у процесі імпульсного опромінення спостерігався багатьма дослідниками [10, 11]. На фоторезистах на основі ХСН випромінюванням з довжиною хвилі 405 нм може здійснюватися запис рельєфних зображень з шириною елементів 0,3–0,8 мкм [2, 12]. Використання цієї технології представляло інтерес для систем запису оптичних дисків у форматах CD, DVD, BD [7] і створення дифракційних оптичних елементів [2].

Формування нанорозмірних рельєфних структур на тонких плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників дифракційно-обмеженими оптичними системами є проблематичним. Для формування нанорозмірних елементів і структур пропонувалося використовувати ближньопольові системи фокусування оптичного випромінювання або змінювати структуру тонкоплівкового реєстрального середовища. Ближньопольовим зондом з апертурою 120 нм були записані лінії шириною 100 нм і глибиною 23 нм на плівці As_2S_3 [14]. Основним недоліком запису цим методом є низька швидкість сканування (100 мкм/с), що пояснюється низькою ефективністю ближньопольових зондів на базі конічних світловодів [14, 15]. Ситуація із використанням ближньопольових зондів для запису нанорозмірних елементів на неорганічних резистах може змінитися при створенні нових більш ефективних зондів для фокусування лазерного випромінювання, зокрема, мікроскопичних пірамідальних зондів [15].



а)



б)

Рис. 1. Мікрорельєфні структури, що отримані на неорганічних резистах різних типів на базі тонких плівок халькогенідних склоподібних напівпровідників [12]:

а) негативний резист; б) позитивний резист

Для запису нанорозмірних елементів дифракційно обмеженими оптичними системами раніше пропонувалося розміщувати на фоточутливому шарі додатковий маскуючий шар, який змінює показник заломлення при підвищеній температурі, наприклад, напівпровідникову плівку з великою шириною забороненої зони [16]. Для формування нанорозмірних відбитків на тонкій плівці халькогенідного напівпровідника була реалізована технологія експонування через діафрагму (маску), створену в матеріалі з нелінійною експозиційною характеристикою (технологія високороздільного ближньопольового зберігання Super-RENS). Одним із основних елементів диска Super-RENS є маска, яка використовується для формування світлового променя мінімального розміру для експонування фоточутливого шару з халькогенідного напівпровідника та відділена від нього захисним шаром фіксованої товщини. Розмір оптичної плями, створеної маскою, у кінцевому підсумку визначає розмір елементів, які записуються на носії. Схема методу запису Super-RENS наведена на рис. 2 [17].

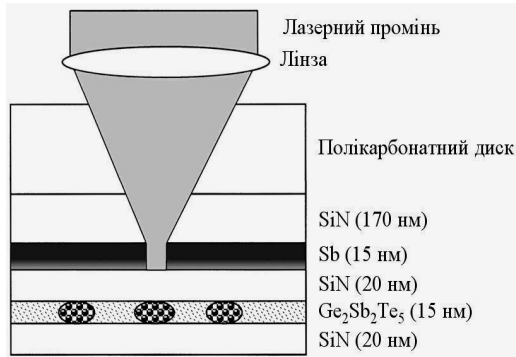


Рис. 2. Отримання нанорозмірних відбитків на плівці халькогенідного напівпровідника за технологією Super-RENS [16]

Як матеріал діафрагми у перших експериментах використовувалися тонкі плівки сурми (Sb) товщиною 15 нм, розташовані між захисними шарами SiN (рис. 2) [17]. Було виявлено значну оптичну нелінійність тонкої плівки сурми, розташованої між діелектричними шарами. Зміна пропускання виявилася відносно значною та стабільною у часі в області із субмікронними розмірами. Така технологія запису дозволила отримати на плівках GeSbTe (GST) відбитки з лінійними розмірами менше 100 нм [17]. У цій структурі тонкоплівкова маска, виконана із Sb, була розміщена на відстані ближнього поля до реєструвального шару. Було виявлено, що матеріал Sb_2Te_3 також може використовуватися як маскуючий шар. З його використанням були записані відбитки з лінійними розмірами 60 нм на матеріалі з фазовим переходом (GeSbTe). Як захисний шар використовувався діелектричний матеріал $ZnS-SiO_2$. Можливість запису та відтворення елементів з субмікронними розмірами пояснюється тим, що в процесі запису та зчитування в маскуючому шарі формується невеликий отвір, який функціонує як локальна твердотільна ближньопольова лінза [18]. Більшими можливостями для створення систем надщільного запису володіє альтернативна конструкція Super-RENS, в якій замість шару Sb використовувався шар з оксидів благородних металів (AgO_x , PtO_x та PdO_x). Опромінення оксидного шару призводило до розкладання оксиду та формування шару наночастинок металу. Процес хімічного розкладання відбувається в інтервалі температур від 400°C до $\sim 500^\circ\text{C}$. Поверхневі плазмони, збуджені світлом на утворених наночастинках благородних металів, генерують оптичне ближньопольове випромінювання, яким здійснюється експонування фоточутливого шару. Структура такого носія наведена на рис. 3 [18].

Найбільш детально були досліджені носії інформації з шаром Ag_2O . Шар Ag_2O в носії Super-RENS відіграє роль центру сильного розсіювання світла в локальній області багат шарового носія. Оптичне ближнє поле, яке створюється навколо центру розсіювання з Ag_2O , у 40 разів сильніше, ніж поле, створюване шаром сурми [20]. Проведені дослідження показали, що більша ефективність дисків з високою роздільною здатністю супер-RENS з шаром AgO_x пов'язана з утворенням локалізованих поверхневих плазмонів кластерами срібла, дисоційованими з шару AgO_x . Діаметр наночастинок срібла становив приблизно 4 нм. На щільність і розподіл дисоційованих наночастинок срібла впливає інтенсивність сфокусованого лазерного випромінювання. Локалізовані поверхневі плазмони покращують ефективність зчитування в таких носіях [21].

Технологія збудження металевих наночастинок і використання оптичного ближньопольового випромінювання для експонування фоточутливих шарів виявилася досить ефективною і продовжує розвиватися при створенні нових типів носіїв для запису нанорозмірних структур. Схематичне зображення носія інформації з шаром наночастинок благородних металів наведено на рис. 4.



Рис. 3. Структура носія, виготовленого за технологією Super-RENS з використанням оксидів благородних металів [18]

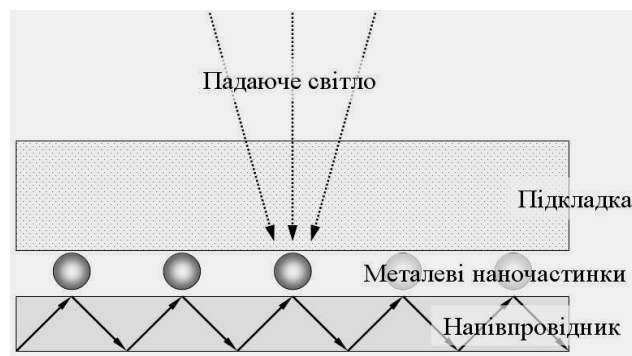


Рис. 4. Носій інформації з шаром наночастинок благородних металів

Наночастки благородних металів з розмірами порядку десятків нанометрів можуть мати істотний вплив на процеси запису інформації у різних типах оптичних і магнітних носіїв інформації.

Експериментально спостерігалось збільшення магнітооптичного обертання Керра в наногранульованих плівках $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$, покритих наночастинками Au різної форми. Встановлено, що збільшення магнітооптичного обертання Керра залежить від складу метало-діелектричних гранульованих плівок $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ і форми наночастинок золота [22, 23].

Технологія використання наночастинок є одним із способів подолання дифракційної межі в процесі запису нанорозмірних структур. Генерація локалізова-

них плазмонів у наночастинках благородних металів широко використовується для підсилення взаємодії світла з матрицею, що оточує ці плазмонні наноструктури. Падаюче світло, яке поглинається НЧ і перетворюється в колективні коливання вільних електронів у них, призводить до сильного посилення локального електричного поля [24]. Металеві наночастинки ефективно поглинають світло. Їхня здатність фокусувати світло в невеликі об'єми призвела до використання НЧ у різних областях, у тому числі як концентраторів світла для елементів сонячної енергетики. Світлоконцентруючі властивості металевих наноструктур є наслідком підсилення електромагнітних полів за рахунок генерування локалізованих плазмонів [25]. Індуковане світлом плазмоне нагрівання магнітного носія у процесі магнітного запису (із вбудованою плазмонною антеною) може використовуватися для реалізації режиму термоасистування і, в кінцевому підсумку, до підвищення щільності запису інформації [22, 26].

Лазерний запис дифракційних оптичних елементів на плівках ХСН

Однією з областей застосування технологій формування нанорозмірних елементів на тонких плівках халькогенідних склоподібних напівпровідників може стати прямий лазерний запис дифракційних оптичних елементів. Використання плоских дифракційних оптичних елементів в оптиці відкриває перспективу створення дешевих, легких, компактних і функціонально складних оптичних приладів. Діапазон застосування дифракційних оптичних елементів дуже широкий: від штучних кристаликів ока людини до оптики космічних телескопів. Основою технології виготовлення дифракційних оптичних елементів є методи створення поверхневого рельєфу з субмікронними розмірами [27]. Останнім часом проявляється великий інтерес до виготовлення методом прямого лазерного запису на ХСН мікрорельєфних одно-, дво- та тривимірних періодичних структур і фотонних нанокристалів [3, 28]. Вони мають якісно нові та цікаві оптичні, нелінійно-оптичні та квантово-оптичні властивості [1]. Для отримання високоапертурних дифракційних оптичних елементів необхідно забезпечувати запис ліній з високою щільністю (понад 2000 лін/мм) [29]. Важливим завданням є розробка плоских дифракційних лінз для фокусування випромінювання у пляму з розмірами, близькими до дифракційної межі [27]. Виготовлення дифракційних оптичних елементів представляє складний технологічний процес, основою якого у більшості випадків є прямий лазерний запис [30, 31]. Слід зазначити, що для отримання дифракційних оптичних елементів можуть використовуватися також методи алмазного фрезерування (точіння) [32]. У представленій на рис. 5 узагальненій схемі виготовлення дифракційних оптичних елементів методом прямого лазерного запису [29] як фоторезист доцільно використовувати халькогенідні склоподібні напівпровідники.

Властивості неорганічних резистів на основі халькогенідних склоподібних напівпровідників дозволяють використовувати їх як для запису напівтонових зображень, так і бінарних структур [2, 33]. Особливу увагу привертає можливість запису на ХСН тривимірних періодичних структур [28]. Істотною перевагою неорганічних резистів на основі ХСН перед органічними є можливість формування складних оптичних структур з нанорозмірними елементами за один етап травлення [34].

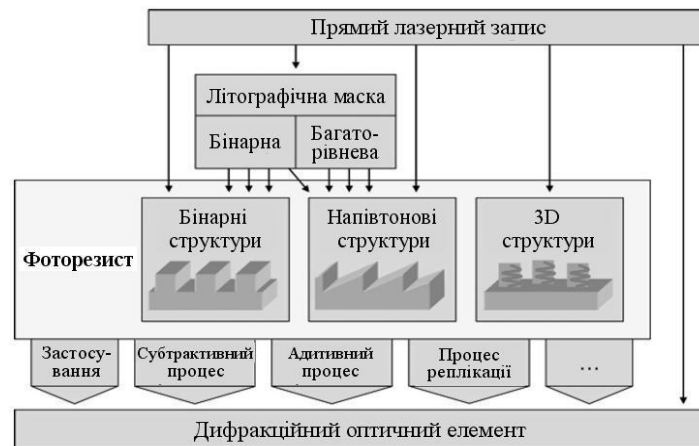


Рис. 5. Узагальнена схема виготовлення дифракційних оптичних елементів методом прямого лазерного запису [29]

Товщина шару фоторезисту залежить від необхідної структури і конфігурації дифракційного оптичного елемента та подальшого процесу обробки. Типові значення становлять від декількох сотень нанометрів до кількох мікрометрів. Залежно від режиму опромінення фоторезисту створюється необхідний профіль на його поверхні. Отриманий профіль на фоторезисті може використовуватися безпосередньо як дифракційний елемент. Переваги резистів на основі халькогенідних стекел перед іншими типами резистів обумовлені їхніми високими показниками заломлення, широким діапазоном прозорості та більшою механічною міцністю. Крім того, неорганічні фоторезисти на основі ХСН характеризуються широким динамічним діапазоном процесу запису, можуть використовуватися як у позитивному, так і в негативному режимах [2, 35]. На рис. 6 наведені АСМ-зображення ліній субмікронних розмірів, отриманих на неорганічному негативному резисті, які можуть бути частиною дифракційного оптичного зображення.

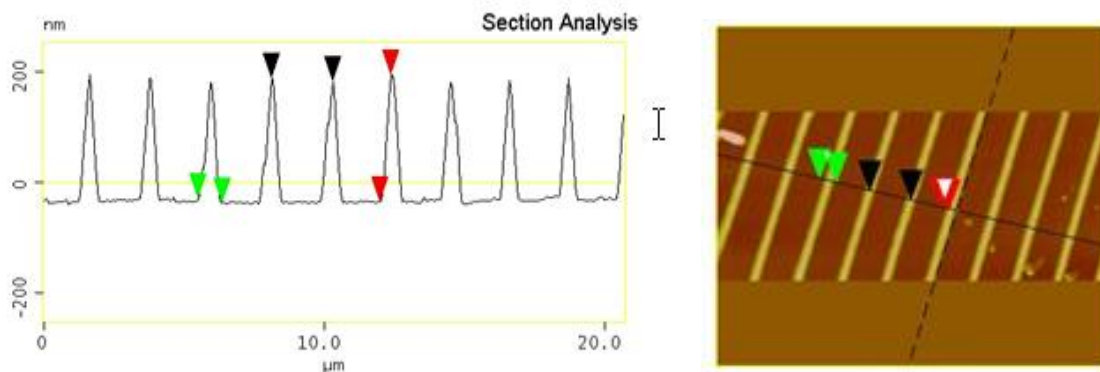


Рис. 6 АСМ-зображення ліній, отриманих експонуванням сфокусованим лазерним випромінюванням з довжиною хвилі 405 нм на неорганічному негативному резисті. Ширина ліній становить 0,8 мкм, крок 2 мкм [2]

Схема прямого лазерного запису дифракційних оптичних елементів у цілому подібна до схеми запису даних на оптичні носії інформації. Система працює в по-

лярних координатах. Їстотна відмінність полягає тільки в тому, що необхідно записувати доріжки різної ширини, розташовані на суворо визначеній відстані. Кругова лазерна система запису використовувалася для виготовлення напівтонових дифракційних оптичних елементів [36]. Розробки зі створення високоточних систем лазерного запису дисків-оригіналів для виготовлення компакт-дисків [7, 8, 10] можуть бути використані і в технології виготовлення дифракційних оптичних елементів. Слід зазначити, що час запису дифракційних оптичних елементів залежить головним чином від необхідних роздільної здатності та розміру елементів і може бути значно більшим часу запису дисків-оригіналів. У зв'язку з тим, що частина дифракційних оптичних елементів, наприклад, лінійні ґратки, лінзи Френеля, акситонні структури складаються з періодичних або квазіперіодичних лінійних структур, то для значного збільшення швидкості виготовлення пропонується записати декілька рядків одночасно та здійснювати розпаралелювання процесу запису. Крім того, на відміну від стандартних систем прямого лазерного запису, в яких сфокусований лазерний промінь сканується покритою фоторезистом підкладкою, для отримання необхідного малюнка пропонується використовувати систему інтерференційної літографії зі скануючим променем (SBIL) та автоматичною генерацією кількох ліній одночасно. Експонування фактично здійснюється мініатюрною інтерференційною картиною [29]. Додатковою перевагою прямого лазерного запису є можливість формування дифракційних оптичних елементів на не плоских підкладках з відхиленнями кута до 15° . Комбінація дифракційних і заломлюючих функцій на одній оптичній поверхні створює додаткові можливості для формування спеціалізованих оптичних систем (наприклад, системи візуалізації та тривимірного лазерного сканування, оптика для формування лазерного променя та інші) [29].

Виготовлення високоефективних дифракційних оптичних лінз вимагає формування великої кількості кільцевих мікрорельєфних елементів із субмікронними розмірами (0,1–0,5 мкм), які розміщені на суворо визначених відстанях. Відхилення від заданих значень розташування елементів призводить до розсіювання світла, що пов'язане з його дифракцією [37]. Тому одним із основних завдань при створенні системи прямого лазерного запису оптичних дифракційних елементів є розробка мікропроцесорної системи управління потужністю експонувального лазерного випромінювання та положення головки запису.

Формування мікрорельєфних структур на поверхні халькогенідних плівок

Одним із найбільш перспективних напрямків використання оптичного та електронно-променевого запису на халькогенідних склоподібних напівпровідниках є прямий одностадійний процес формування мікрорельєфу на поверхні плівок, який тісно пов'язаний з індукованим масопереносом (у вертикальному або бічному напрямках) в аморфному матеріалі при освітленні. При прямому одностадійному лазерному або електронно-променевому записі відбувається незворотне амплітудно-фазове оптичне та геометричне структурування поверхні. Цей ефект може бути використаний для виготовлення мікролінз, амплітудно-фазових оптичних елементів. Процес прямого фотоіндукованого виготовлення мікрорельєфних структур на плівках ХСН шляхом латерального масопереносу досліджувався на

плівках різного складу та при різних способах опромінення. В результаті, були запропоновані моделі процесів, що спостерігаються, і визначені області можливого застосування [1, 24, 38]. Експериментально була показана можливість створення планарних дифракційних оптичних елементів при електронно-променевому експонуванні з локальною зміною показника заломлення. Лінза створюється у вигляді записаних електронним променем кільцевих зон з покроковим зменшенням показника заломлення. Зображення лінзи Френеля, отриманої таким методом, наведено на рис. 7. Мінімальна ширина елементів у записаному зображенні становить $\sim 0,6\text{--}1,0$ мкм [38].

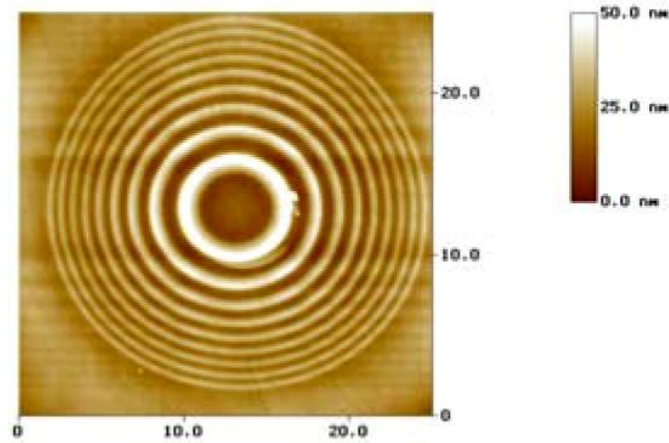


Рис. 7. Зображення лінзи Френеля, отриманої методом прямого одностадійного процесу формування мікрорельєфу [38]

Прямий одноступеневий лазерний або електронно-променевий запис відбувається більш ефективно в нанорозмірних шаруватих структурах $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$ і $\text{Sb}/\text{As}_2\text{S}_3$, ніж в однорідних шарах As_2S_3 [38]. Ефект фотоіндукованого масопереносу дозволяє отримувати голографічні ґратки, інтегральні оптичні елементи чисто оптичним методом при порівняно малих інтенсивностях світлових потоків [1, 24, 38–41]. Зображення дифракційної ґратки, отриманої прямим (оптичним) методом за рахунок фотоіндукованого масопереносу речовини плівки ХСН, наведено на рис. 8.

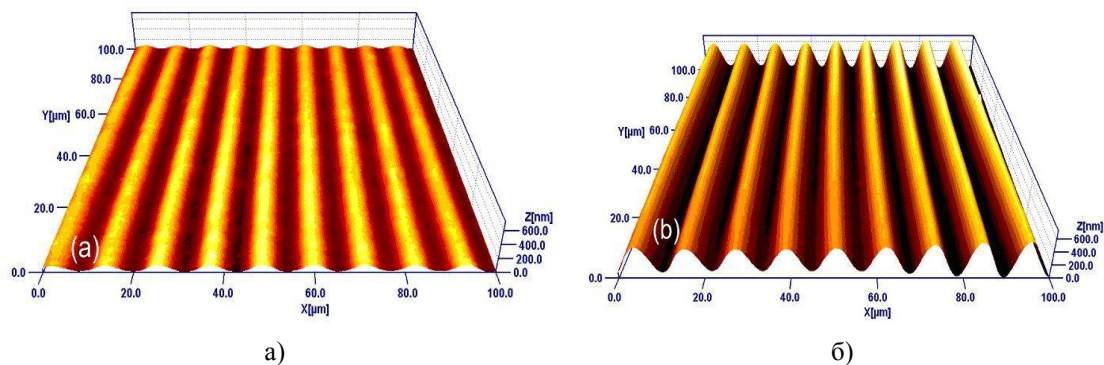


Рис. 8. АСМ-зображення дифракційних ґраток, записаних при температурах 77 К (а) і 300 К (б) на тонких плівках $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ [39]

Форму рельєфу та дифракційну ефективність можна змінювати співвідношенням поляризацій записуючих променів і променя додаткового підсвічування. Основне обмеження методу пов'язано з тривалими часом експонування.

Висновки

1. Збільшення роздільної здатності реєструвальних середовищ на основі склоподібних халькогенідних напівпровідників може бути досягнуто за рахунок вибору режимів запису та складу стекол, при яких найбільш сильно проявляється нелінійність експозиційної характеристики fotocувствительного матеріалу, а також введення до структури реєструвальних середовищ наночастинок благородних металів для збудження локального плазмонного резонансу.

2. Перспективним напрямком застосування халькогенідних склоподібних напівпровідників може стати прямий лазерний запис дифракційних оптичних елементів на модернізованих станціях лазерного запису дисків-оригіналів.

3. Унікальні властивості халькогенідних склоподібних напівпровідників дозволяють формувати мікрорельєфні зображення без селективного хімічного травлення за рахунок опромінення тонких плівок променями з різною поляризацією.

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, здійснення запису інформації і обробки носіїв інформації, а також за плідне обговорення результатів досліджень.

1. Achimova E. Direct surface relief formation in nanomultilayers based on chalcogenide glasses. *A review. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2016. Vol. 52. No. 5. P. 456–468. <https://doi.org/10.3103/S1068375516050021>.

2. Петров В.В., Крючин А.А., Рубін В.М., Костюкевич С.О. Неорганічна фотолітографія. Київ: ІМФ НАНУ, 2007. 196 с.

3. Isbi Y., Sternklar S., Granot E., Lyubin V., Klebanov M., Lewis A. Sub-wavelength optical recording on chalcogenide glassy film. *Optics communications*. 1999. Vol. 171. No. 4/6. P. 219–223. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00541-6](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00541-6).

4. Tanaka K. Photoinduced structural changes in amorphous semiconductors. *Semiconductors*. 1998. Vol. 32. P.861–866. <https://doi.org/10.1134/1.1187473>

5. Kovalskiy A., Vlcek M., Waits C.M., Dubey M. Chalcogenide glass e-beam and photoresists for ultrathin grayscale patterning. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*. 2009. Vol. 8. No. 4. P. 043012.

6. Kolobov A.V., Tominaga J. Chalcogenide glasses in optical recording: recent progress. *Opt. and Advanc. Mat.* 2002. Vol. 4. No. 3. P. 679–686.

7. Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М., Беляк Є.В. Надщільний оптичний запис інформації. Київ: ІПІ НАНУ, 2009. 320 с.

8. Kokenyesi S., Ivan I., Takats V., Pálkás J., Biri S., Szabó I. Formation of surface structures on amorphous chalcogenide films. *J. Non-Cryst. Sol.* 2007. Vol.353. P. 1470–1473. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.09.064>

9. Vlcek M., Jain H. Nanostructuring of chalcogenide glasses using electron lithography. *J. Opt. and Advanc. Mat.* 2006. Vol. 8. No.6. P. 2108–2111.

10. Kryuchyn A.A., Petrov V.V., Rubish V.M., Trunov M.L., Lytvyn P.M., Kostyukevich S.A. Formation of Nanoscale Structures on Chalcogenide Films. *Phys. Stat. Solidi B*. 2017. P. 1700405. <https://doi.org/10.1002/pssb.201700405>
11. Индутный И.З., Луканюк М.В., Минько В.И. и др. Оптическая запись микро- и наноразмерных рельефных структур на неорганических резистах Ge-Se. *Регістрація, зберігання і обробка даних*. 2013. Т. 14. № 5. С. 3–12.
12. Kryuchyn A.A., Petrov V.V., Kostyukevych S.O. High density optical recording in thin chalcogenide films. *J. Opt. and Advanc. Mat.* 2011. Vol. 13. No. 11–12. P. 1487–1492.
13. Helseth L.E. Breaking the diffraction limit in nonlinear materials. *Optics Communications*. 2005. Vol. 256. No. 4–6. P. 435–438. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.06.074>
14. Noach S., Manevich M., Eisenberg N.P., Davidov D., Klebanov M., Lubin V. Optical near-field lithography in halcogenidefilms. *Optical Materials*. 2006. Vol. 28. P. 1054–1057. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2005.06.004>
15. Петров В.В., Крючин А.А., Куницкий Ю.А., Рубіш В.М., Лапчук А.С., Костюкевич С.О. Методи нанолітографії. Київ: Наук. думка, 2015. 262 с.
16. Wu Y., Chong C.T. Theoretical analysis of a thermally induced superresolution optical disk with different readout optics. *Appl. Opt.* 1997. Vol. 36. P. 6668–6682. <https://doi.org/10.1364/AO.36.006668>
17. Tominaga J., Nakano T., Atoda N. An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film. *Appl. Phys. Lett.* 1998. Vol. 73. P. 2078. <https://doi.org/10.1063/1.122383>
18. Shi L.P., Chong T.C., Yao H.B., Tan P.K., Miao X.S. Super-resolution near-field optical disk with an additional localized surface plasmon-coupling layer. *J. Appl. Phys.* 2002. Vol. 91. P. 10209. <https://doi.org/10.1063/1.1476068>
19. Liu Q., Fukaya T., Tominaga J., Iwanabe Y., Shima T. Optical Properties of Metal-Oxide Films in Super-RENS. *Jap. J. Appl. Phys.* 2005. **44**. 1. No. 7A. P. 5156–5163. <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.5156>
20. Fukaya T., Buchel D., Shinbori S., Tominaga J., Atoda N. Micro-optical nonlinearity of a silver oxide layer. *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 89. P. 6139. <https://doi.org/10.1063/1.1365434>
21. Chu T.C., Liu W.-Ch., Tsai D.P. Enhanced resolution induced by random silver nanoparticles in near-field optical disks. *Opt. Commun.* 2005. Vol. 246. P. 561–567. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2004.11.001>
22. Kravets V.G., Kabashin A.V., Barnes W.L., Grigorenko A.N. Plasmonic Surface Lattice Resonances. *A Review of Properties and Applications. Chem Rev.* 2018. Vol. 118. No. 12. P. 5912–5951. <https://dx.doi.org/10.1021/acschemrev.8b00243>
23. Kravets A.F., Borodinova T.I., Kravets V.G. Strong plasmon enhancement of magneto-optical Kerr rotation in Co-AlO nanogranular films coated with gold nanoparticles. *J. Optical Society of America B*. 2016. Vol. 33. No. 3. P.e302-308. <https://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.33.000302>
24. Trunov M.L., Lytvyn P.M., Nagy P.M., et. al. Light-induced mass transport in amorphous chalcogenides: Toward surface plasmon-assisted nanolithography and near-field nanoimaging. *Phys. Stat. Solidi (B) Basic Research*. 2014. Vol. 251. 7. P. 1354–1362. <https://doi.org/10.1002/pssb.201350296>
25. Hartland G.V., Besteiro L.V., Johns P., Govorov A.O. What's so Hot about Electrons in Metal Nanoparticles. *ACS Energy Letters*. 2017. Vol. 2. No. 7. P. 1641–1653. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00333>
26. Stipe B.C., Strand T.C., Poon C.C., et.al. Magnetic Recording at 1.5 Pb m⁻² Using an Integrated Plasmonic Antenna. *Nat. Photonics*. 2010. No. 4. P. 484–488. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.90>
27. Сойфер В.А., Котляр В.В., Досколович Л.Л. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники. *Компьютерная оптика*. 2009. Т. 33. № 4. С. 352–368.
28. Wong S., Deubel M., Perez-Willard F., et.al. Direct Laser Writing of Three-Dimensional Photonic Crystals with a Complete Photonic Bandgap in Chalcogenide Glasses. *Adv. Mater.* 2006. Vol. 18. P.265. <https://doi.org/10.1002/adma.200501973>
29. Hafner M., Pruss C., Osten W. Direct writing. Recent developments for the making of diffractive optics. *Optics & Photonics*. 2011. No. 4. P. 40–44.
30. Bowen J.P., Michaels R.L., Blough C.G. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation. *Appl. Opt.* 1997. Vol. 36. P. 8970–8975. <https://doi.org/10.1364/AO.36.008970>

31. Коронкевич В.П., Корольков В.П., Поleshук А.Г. Лазерные технологии в дифракционной оптике. *Автометрия*. 1997. № 6. С. 5–25.
32. Roeder M., Guenther T., Zimmermann A. Review on Fabrication Technologies for Optical Mold. *Inserts Micromachines* (Basel). 2019. Vol. 10. No. 4. P. E233. <https://doi.10.3390/mi10040233>
33. Волков А.В., Казанский Н.Л., Костюк Г.Ф., Костюкевич С.А., Шепелявий П.Е. Формирование микрорельефа ДОЭ с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников. *Компьютерная оптика*. 1999. № 19. P. 129–131.
34. Kostyukevych S., Shepeliavyi P., Svechnikov S., et al. Formation of diffractive optical elements using inorganic laser lithography. *Data Rec., Storage and Processing*. 2002. Vol. 4. No.3. P. 3–12.
35. Koronkevich P., Kiryanov V., Korol'kov V., et. al. Fabrication of diffractive optical elements by laser writing with circular scanning. *Proc. SPIE*. 1994. Vol. 2363. P. 290–298.
36. Perlo P., Sinesi S., Ripetto M., Uspleniev G. The use of a circular laser recording system for the manufacture of halftone patterns of diffractive optical elements based on DLW glass plates. *Computer Optics*. 1997. **17**. P. 85–97.
37. Gil D., Menon R., Smith H.I. Fabrication of high numerical aperture phase zone plates with a single lithography exposure and no etching. *J. Vacuum Science & Technology B*. 2003. Vol. 21. P. 2956. <https://doi.10.1116/1.1619957>
38. Takats V., Miller F., Jain H., Cserhati C., Kokenyesi S. Direct surface patterning of homogeneous and nanostructured chalcogenide layers. *Phys. Stat. Solidi C*. 2009. Vol. 6. No. S1. P. 83–85. <https://doi.10.1002/pssc.200881347>
39. Takáts V., Trunov M.L., Vad K., Low-temperature photo-induced mass transfer in thin As₂₀Se₈₀ amorphous films. *Materials Letters*. 2015. Vol. 160. P. 558–561.
40. Trunov M.L., Rubish V.M., Lytvyn P.M., et. al. Photoinduce mass-transport in amorphous chalcogenides. Proc. XVI intern. conf. «Physics and technology of thin films and nanosystems» ICPTTFN-XVI». Ivano-Frankivsk, Ukraine. 2017. P. 314.
41. Коротун А.В., Коваль А.О., Крючин А.А., Рубиш В.М., Петров В.В., Тітов І.М.. Нанофотонні технології. Сучасний стан і перспективи. Ужгород: ФОП Сабов А.М., 2019. 482 с.

Надійшла до редакції 05.03.2020