

**В.А. Данько, І.З. Індутний, В.І. Минько,
П.Є. Шепелявий, О.С. Литвин, М.В. Луканюк**

ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНА ФОТОЛІТОГРАФІЯ НА ОСНОВІ ЕФЕКТУ ФОТОТРАВЛЕННЯ В ТОНКИХ ШАРАХ ХАЛЬКОГЕНІДНИХ СТЕКОЛ

Виявлено ефект фотостимульованого підвищення розчинності відпалених плівок халькогенідних скловидних напівпровідників (ХСН) в селективних протравлювачах на основі амінів. Встановлено, що швидкість травлення підвищується при збільшенні інтенсивності опромінення, а її спектральна залежність корелює з поглинанням у плівці ХСН в області краю міжзонних переходів. Показано, що новий фотостимульований ефект дає змогу реалізувати фотолітографічний процес (у тому числі процес інтерференційної фотолітографії) на шарах ХСН, відпалених за температури, близької до температури розм'якшення халькогенідного скла, шляхом одночасного експонування та селективного протравлювання таких шарів. Обговорюється можливий механізм фототравлення ХСН.

Ключові слова: фотостимульоване протравлювання, халькогенідний фоторезист, інтерференційна літографія.

ВСТУП

Халькогенідні фоторезисти на основі осаджених у вакуумі за допомогою термічного випаровування аморфних плівок халькогенідних стекол (ХС) характеризуються високою роздільною здатністю, оптичною однорідністю, широким спектральним діапазоном світлочутливості, а також можливістю використання як на плоских, так і не плоских поверхнях [1–4]. Крім того, такі фоторезисти мають високий показник заломлення (в межах від 2,0 до 3,0) і є дуже перспективними для імерсійної літографії, в тому числі високороздільної інтерференційної фотолітографії. Фотостимульовані зміни в осаджених у вакуумі плівках ХС мають дві компоненти: реверсивну та нереверсивну [5,6]. Використання халькогенідних плівок як фоторезистів пов'язане саме з нереверсивною зміною їх розчинності.

У термічно осадженій у вакуумі плівці ХС навіть стехіометричного складу спостерігається значний вміст «неправильних», гомополярних зв'язків, є також пори та пустоти. Унаслідок освітлення (чи відпалу) відбувається полімеризація молекулярних груп в основну матрицю халькогенідного скла, тому кількість гомополярних зв'язків та пустот зменшується, що і приводить до зміни фізико-хімічних властивостей плівки, зокрема і розчинності. Достатньо висока селективність травлення (тобто світлочутливість фоторезиста) спостерігається лише в халькогенідних плівках на основі миш'яку. Плівки на основі халькогенідів германію мало чутливі. Щоб використовувати їх як фоторезисти, необхідно нанести додатковий шар срібла, що значно ускладнює технологічний процес. Крім того, нечутливими є також відпалені плівки ХС, у яких уже відбулась термостимульована полімеризація дефектної структури, а також плівки, нанесені нетермічним способом (лазерне чи магнетронне розпилення у вакуумі, нанесення із розчинів).

У цій праці наведено результати дослідження процесу інтерференційної фотолітографії з використанням нового фотостимульованого ефекту в аморфних халькогенідних плівках — фотоіндукованого підвищення розчинності відпалених плівок ХС у селективному протравлювачі на основі

© В.А. Данько, І.З. Індутний, В.І. Минько, П.Є. Шепелявий, О.С. Литвин,
М.В. Луканюк, 2012

амінів [7]. Одночасне освітлення і протравлювання відпалених плівок ХС спричинює фотоіндуковане підвищення розчинності шарів ХС в селективному протравлювачі, причому негативний протравлювач на основі амінів розчиняє освітлені ділянки халькогенідних плівок, тобто в цьому процесі виступає як позитивний протравлювач [7]. Новий фотостимульований ефект дає змогу реалізувати фотолітографічний процес (у тому числі процес інтерференційної фотолітографії) на шарах халькогеніду, відпалених за температури близької до температури розм'якшення халькогенідного скла, одночасним експонуванням та селективним травленням таких шарів.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Зразки для досліджень готували послідовним термічним випаровуванням у вакуумі $2 \cdot 10^{-3}$ Па та осадженням на підкладки адгезивного шару Сг товщиною 40 нм і шарів ХС товщинами від 300 нм до 3 мкм. Як підкладки використовувались поліровані скляні та кремнієві (орієнтація {111}) пластини. Товщину під час нанесення плівок контролювали за допомогою кварцевого вимірювача товщини (КИТ-1), після осадження — мікроінтерферометром МИИ-4. Після осадження плівки відпалювались за температури T_g від 5 до 15 °С (T_g — температура розм'якшення даного халькогеніду) протягом 0,5—2 год.

Швидкості травлення експонованих та контрольних плівок ХС досліджували за допомогою високочутливого методу кварцевого осцилятора [8] в кварцевій кюветі, заповненій селективним протравлювачем на основі безводного розчину органічного луку [9]. Експонування в процесі травлення здійснювали інтегральним випромінюванням ртутної лампи ДРШ-250. Для дослідження спектральних залежностей ефекту фототравлення за допомогою фільтрів виділяли спектральні лінії випромінювання цієї ж лампи.

Запис інтерференційних структур на відпалених плівках ХС здійснювали, використовуючи їх експонування інтерференційною картиною, створеною випромінюванням гелій-кадмієвого лазера (довжина хвилі $\lambda = 440$ нм) з просторовою частотою ~ 1200 мм⁻¹. При цьому зразки теж розміщували в кварцевій кюветі, заповненій селективним протравлювачем.

Для визначення форми профілю рельєфних елементів і їх розмірів використовували мікроскоп атомних сил Dimension 3000 Scanning Probe Microscope фірми Digital Instruments. Дифракційні властивості досліджували з вимірювань спектральної $\eta(\lambda)$ залежності дифракційної ефективності зразків, які попередньо покривались відбивальним шаром Al товщиною 100 нм. Значення η визначали як відношення інтенсивності дифрагованого випромінювання до інтенсивності падаючого. Спектральні вимірювання проводили для першого порядку дифракції в інтервалі 400—900 нм для двох напрямів поляризації падаючого світла при значенні кута між падаючим і дифрагованим пучками $\sim 8^\circ$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У цій праці досліджено процеси фототравлення плівок ХС цілої низки складів: $As_{40}S_{60}$, $As_{40}S_{40}Se_{20}$, $As_{40}S_{30}Se_{30}$, $As_{40}S_{20}Se_{40}$, $As_{40}Se_{60}$ та $Ge_{25}Se_{75}$. На рис. 1 як приклад наведено кінетичні залежності травлення шарів $As_{40}S_{30}Se_{30}$, початкова товщина d_0 яких 300 нм (d — товщина відповідного шару, що залишилась після протравлювання, t — час травлення) у селективному протравлювачі для $As_{40}S_{30}Se_{30}$ на основі амінів [9]: 1 — свіжоосаджений неекспонований шар $As_{40}S_{30}Se_{30}$ (контрольний); 2 —

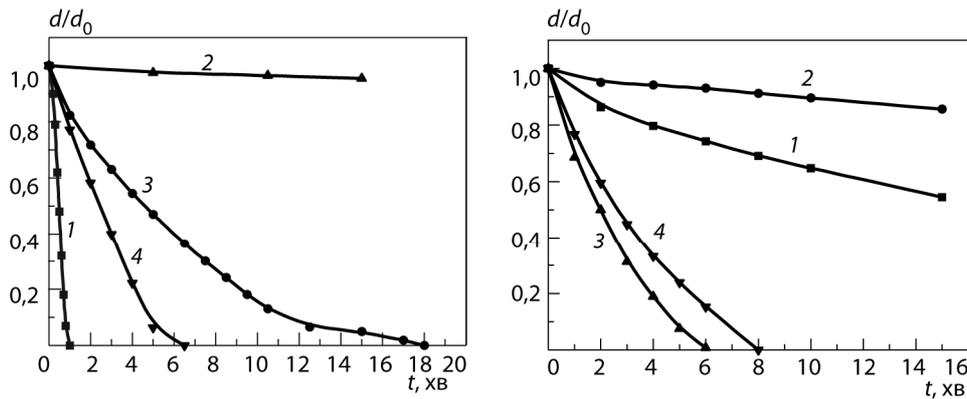


Рис. 1. Кінетики розчинення шарів $As_{40}S_{30}Se_{30}$: 1 — свіжоосаджений неекспонований шар; 2 — відпалений, неекспонований шар; 3 — відпалений, експонований в процесі протравлювання інтегральним випромінюванням ртутної лампи ДРШ-250 з енергетичною густиною падаючого випромінювання $p = 8,8$ мВт/см²; 4 — $p = 54,4$ мВт/см²

Рис. 2. Кінетики розчинення шарів $Ge_{25}Se_{75}$: 1 — свіжоосаджений неекспонований шар; 2 — відпалений, неекспонований шар; 3 — свіжоосаджений, експонований в процесі травлення інтегральним випромінюванням ртутної лампи ДРШ-250 з енергетичною густиною падаючого випромінювання $p = 8,8$ мВт/см²; 4 — відпалений, експонований в процесі травлення в тих само умовах

відпалений неекспонований шар; 3 — у процесі травлення відпалений шар $As_{40}S_{30}Se_{30}$ експонувався інтегральним випромінюванням ртутної лампи ДРШ-250 з енергетичною густиною падаючого випромінювання $p = 8,8$ мВт/см²; 4 — енергетична густина падаючого випромінювання — 54,4 мВт/см². Як можна бачити з рис. 1, вибраний безводний протравлювач на основі органічних лугів характеризується доброю селективністю для відпаленого шару $As_{40}S_{30}Se_{30}$ (селективність, тобто відношення швидкостей розчинення експонованого і неекспонованого шарів досягає 35). Але на відміну від традиційної літографії з використанням термічно осаджених (і невідпалених) шарів ХС, де є негативна селективність (неекспоновані ділянки фоторезисту розчиняються швидше (крива 1), ніж експоновані (крива 2), у випадку фототравлення значно швидше розчиняються ті шари ХС, які експонуються в процесі травлення (криві 3 і 4, порівняно з кривою 2)). Зі збільшенням інтенсивності випромінювання швидкість розчинення зростає нелінійно: унаслідок шестикратного збільшення p час повного розчинення плівки $As_{40}S_{30}Se_{30}$ можна зменшити лише в три рази (див. рис. 1).

На тотожних відпалених зразках було проведено контрольні експерименти: зразки спочатку експонувались за тієї ж енергетичної густини падаючого випромінювання до такої само експозиції ($H = pt$), що і на рис. 1, потім травились у тому самому протравлювачі. При цьому швидкість травлення була близькою до швидкості травлення неекспонованих зразків (див. рис. 1, крива 2). Тобто протравлювач ефективно діє на плівку ХС лише під час її безпосереднього експонування.

На рис. 2 наведено кінетику розчинення шарів халькогеніду германію (склад $Ge_{25}Se_{75}$) з тією ж початковою товщиною (300 нм) і в тому самому безводному протравлювачі: крива 1 — свіжоосаджений неекспонований шар; 2 — відпалений неекспонований шар; 3 — свіжоосаджений шар, який експонувався під час травлення інтегральним випромінюванням ртутної лампи ДРШ-250 з енергетичною густиною падаючого випромінювання 8,8 мВт/см²; 4 — відпалений шар, який експонувався під час травлення інтегральним випромінюванням тієї ж лампи з тією самою енергетичною густиною падаючого випромінювання. З рисунка

видно, що ефект фототравлення проявляється як на свіжоосаджених, так і на відпалених шарах халькогенідів германію, на відміну від халькогенідів миш'яку, де унаслідок великої швидкості розчинення свіжоосаджених шарів та стимульованої фотоактивним світлом їх фотополімеризації не можна зареєструвати ефект фототравлення на таких шарах (ефект фототравлення спостерігався лише на відпалених шарах халькогенідів миш'яку).

Дослідження спектральної залежності швидкості фототравлення відпалених шарів $As_{40}S_{30}Se_{30}$ показало, що швидкість травлення суттєво залежить від спектрального складу випромінювання. В області краю поглинання $As_{40}S_{30}Se_{30}$ встановлено кореляцію коефіцієнта поглинання халькогеніду та швидкості фототравлення — зі збільшенням поглинання у разі зміщення в короткохвильову область спектра зростає і швидкість фототравлення. Однак в ультрафіолетовій області спектра (<300 нм) ефективність фототравлення дещо знижується.

Аналогічні результати отримано на всіх досліджуваних плівках ХС. Такі результати свідчать про можливість використання фототравлення ХС для формування літографічних масок чи інтерференційних рельєфних структур. Повне розчинення плівки ХС товщиною 100 нм у разі експонування короткохвильовим випромінюванням (365—436 нм) потребує експозиції 0,3—0,6 Дж/см², тобто чутливість порівнянна з чутливістю плівок ХС у традиційному використанні як фоторезиста [10]. Водночас фототравлення ХС має низку переваг. Воно реалізується на відпалених шарах халькогенідів, які характеризуються значно меншою дефектністю, ніж термічно осаджені і невідпалені плівки. Це дає змогу отримувати якісніші літографічні маски, чи періодичні рельєфно-фазові структури. При одночасному експонуванні і травленні достатню світлочутливість проявляють також і халькогеніди на основі германію. Це дало можливість використовувати ці більш екологічно прийнятні сполуки як фоторезисти. Процеси травлення та експонування в цьому способі суміщені, що зменшує кількість технологічних операцій в фотолітографічному процесі. При фототравленні для нанесення плівок халькогеніду можна використовувати і більш технологічні методи осадження тонких плівок: електронно-променево випаровування, лазерне чи високочастотне магнетронне розпилення, нанесення на підкладку із розчинів. Після відпалу за температури, близької до температури розм'якшення, властивості всіх плівок халькогенідів, незалежно від способу нанесення, наближаються до властивостей халькогенідного скла відповідного складу.

На рис. 3, а наведено АСМ-зображення дифракційної ґратки, сформованої на плівці $As_{40}S_{30}Se_{30}$ методом фототравлення з використанням того ж безводного протравлювача. Просторова частота записаної ґратки — 1200 мм⁻¹, глибина рельєфу — 75 нм. Форма профілю штрихів сформованої ґратки (рис. 3, б) близька до синусоїди. Час запису ґратки 20 хв, розміри 50 × 50 мм за потужності лазера 25 мВт. Під час експонування поглинаючим випромінюванням гелій-кадмієвого лазера, яке викликає фототравлення, здійснювався *in situ* контроль дифракційної ефективності сформованої ґратки за допомогою нефотоактивного випромінювання гелій-неонового лазера ($\lambda = 632$ нм). Унаслідок збільшення часу фототравлення можна отримувати ґратки з більшою глибиною рельєфу.

Фотостимульоване розчинення халькогенідів відбувається лише в освітлених місцях, що дає змогу отримувати маски та рельєфні структури з глибоким рельєфом завдяки відсутності бокового ізотропного підтравлювання, яке має місце в традиційній літографічній технології при використанні рідинного травлення. Тобто рідинне фототравлення є аналогом більш затратного сухого анізотропного травлення в традиційній

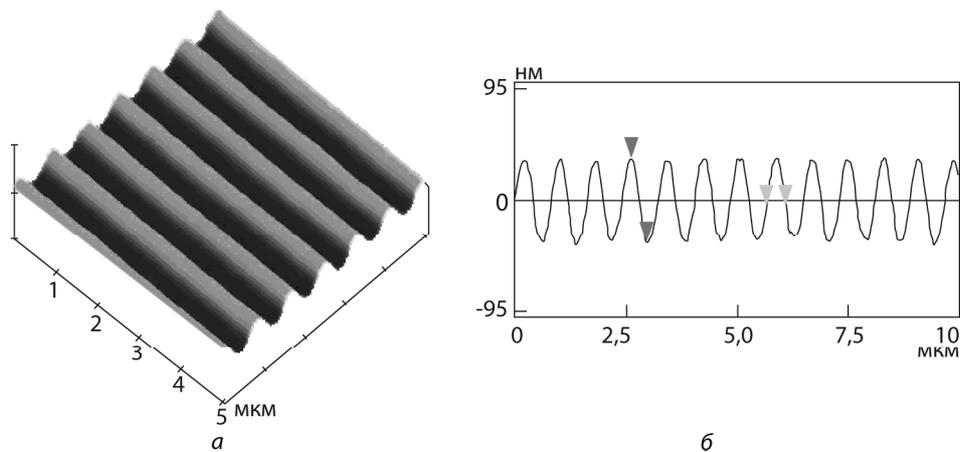


Рис. 3. АСМ зображення дифракційної ґратки, записаної в шарі $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ методом фототравлення

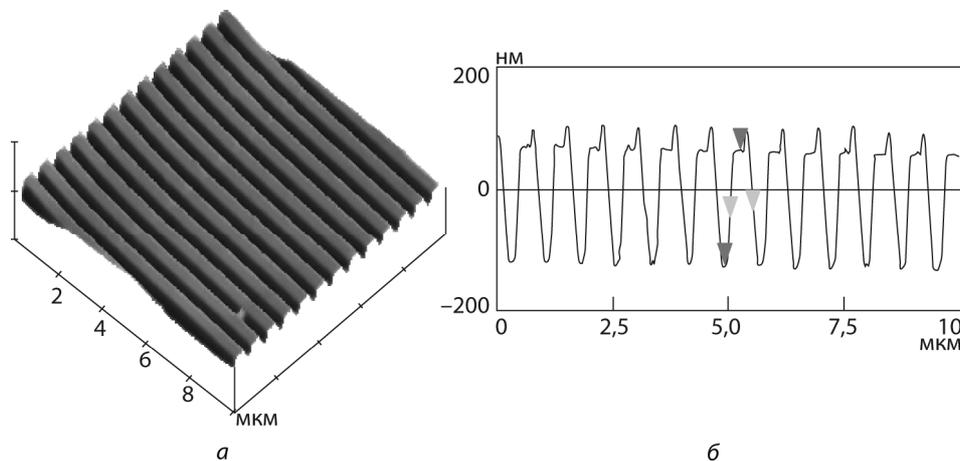


Рис. 4. АСМ зображення дифракційної структури, сформованої в шарі $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ методом фототравлення через Au-маску

технології. Щоб реалізувати цю можливість на поверхні відпаленого шару $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ за допомогою традиційної інтерференційної фотолітографії [10], було сформовано маску у вигляді смужок золота з просторовою частотою 1300 мм. Потім через цю маску було здійснено фотостимульоване травлення шару ХС з використанням того ж селективного протравлювача на основі амінів та інтегрального випромінювання ртутної лампи.

На рис. 4, *a*, *б* наведено АСМ-зображення отриманої дифракційної структури, сформованої на плівці $\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$ методом фототравлення через металеву маску. Структура має вигляд дифракційної ґратки з глибиною рельєфу яка досягає 0,22 мкм. Форма профілю штриха трапецевидна, досить подібна до прямокутної. Спостерігається значна глибина модуляції рельєфу ($\approx 0,3$), а також якісна поверхня штрихів.

Сформована дифракційна структура має відповідні властивості голографічної дифракційної ґратки. На рис. 5 наведено спектральну залежність дифракційної ефективності цього зразка, покритого відбиваючим шаром Al. Криві 1 та 2 відповідають перпендикулярному (E_s) та паралельному (E_p) розташуванню електричного вектора світлової хвилі відносно штрихів ґратки. Як бачимо з рисунка, велика глибина модуляції та несинусоїдальний профіль штриха ґратки обумовлюють високі (до 60%)

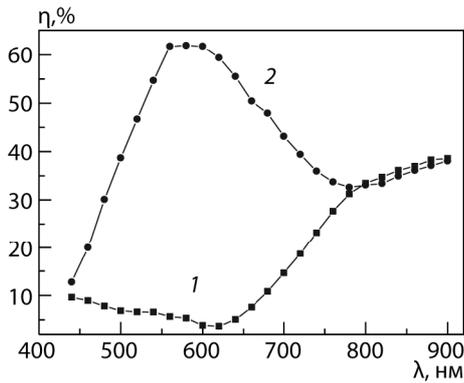
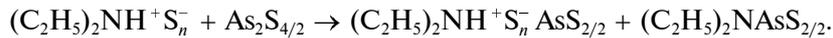
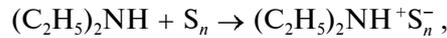


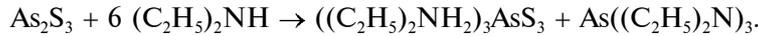
Рис. 5. Спектральний розподіл дифракційної ефективності ґратки сформованої на плівці $As_{40}S_{30}Se_{30}$ методом фототравлення через металеву маску: 1, 2 — відповідно перпендикулярне та паралельне розташування електричного вектора світлової хвилі відносно штрихів ґратки

значення дифракційної ефективності у видимій та ближній ІЧ-областях спектра.

Механізм селективного розчинення плівок ХС вивчався багатьма авторами [11–13]. Для безводних травників на основі амінів найдетальніші дослідження виконано в праці [11]. Автори вважають, що розрив полімерної сітки свіжонапиленої плівки халькогенідів відбувається по гомополярних (дефектних) зв'язках за допомогою двостадійного процесу: на першій стадії реагує халькоген, на другій — структурні одиниці з атомами миш'яку:



Така реакція протікає швидше, ніж взаємодія цього протравлювача з бездефектним стехіометричним склом, яке складається переважно з гетерополярних зв'язків:



Тому коли експонування або відпал свіжонапиленої плівки ХС зменшують кількість гомополярних зв'язків, то відбувається суттєве сповільнення швидкості розчинення халькогеніду (див. рис. 1, криві 1 і 2).

Яка ж причина відновлення швидкого розчинення відпаленої плівки в процесі її експонування, тобто появи ефекту фототравлення? Дослідження плівок ХС у процесі експонування показали [14, 15], що за достатньої інтенсивності випромінювання, коли в плівці генерується значна концентрація фотозбуджених носіїв, структура плівки дещо змінюється. Про це свідчить і явище фотостимульованої текучості (фотопластичності) у плівках бінарних халькогенідів та селену, яке вивчалось багатьма дослідниками [16–18]. Воно характеризується зменшенням в'язкості та збільшенням текучості плівок ХС, які експонуються світлом достатньої інтенсивності, і спостерігається лише в процесі експонування ХС. Запропоновано декілька мікроскопічних механізмів фотопластичності [18, 19]. Фріцше [19] пов'язує фотопластичність із стимульованою світлом генерацією пар змінної валентності та рекомбінаційно-стимульованим зміщенням атомів. Інші автори [18] на підставі результатів EXAFS-досліджень у процесі освітлення халькогеніду пропонують механізм, який включає фотостимульовану перебудову ковалентних зв'язків. Фотостимульоване розм'якшення аморфного селену ці автори пов'язують з розривом міжланцюжкових зв'язків.

Для бінарних та потрійних халькогенідів, крім координаційних дефектів, у процесі експонування можливе утворення гомополярних зв'язків, збільшення концентрації яких згідно з [11] приведе до збільшення швидкості розчинення в протравлювачі на основі амінів. Але помітна кількість сформованих в процесі експонування дефектів повинна зберегтися в плівці і після виключення освітлення (реверсивні фотоструктурні зміни). Проте, як вказано вище, в експонованих плівках ХС

на відміну від неекспонованих не спостерігалось суттєве підвищення швидкості розчинення. Крім того, ефект фототравлення в халькогенідах германію спостерігається також і на невідпалених шарах, у яких концентрація дефектів значна (див. рис. 2, криві 1 та 3). Це свідчить про те, що реакція фоторозчинення ХС швидше за все стимулюється саме процесами переключення зв'язків (bond switching) під час експонування фотоактивним випромінюванням.

ВИСНОВКИ

Проведено перші дослідження ефекту фотостимульованого розчинення відпалених плівок ХС. Показано, що протравлювачі негативної дії на основі амінів розчиняють освітлені місця плівки халькогеніду, тобто діють як позитивні протравлювачі. Швидкість фотостимульованого розчинення зростає зі збільшенням інтенсивності освітлення, а спектральна залежність корелює зі спектром поглинання в області краю міжзонних переходів.

Виконано запис рельєфно-фазових голограмних ґраток з використанням ефекту фототравлення на шарах ХС, а також досліджено їх характеристики. Припускається, що реакція фотостимульованого розчинення ХС стимулюється процесами переключення зв'язків між атомами ХС під час експонування фотоактивним випромінюванням.

**V.A. Dan'ko, I.Z. Indutnyi, V.I. Min'ko,
P.E. Shepeliavyi, O.S. Litvin, M.V. Lukanyuk**

PHOTOINDUCED ETCHING OF THIN FILMS OF CHALCOGENIDE GLASSES

It is found the photoinduced enhancement in solubility of annealed films of chalcogenide glasses (ChG) in amine-based selective etchants. With increasing of irradiation intensity the rate of the films etching rises, and its spectral dependence correlates with absorption of ChG films in the spectral range near absorption edge. The new photo-induced effect allows realize a photolithography (including the process of interference photolithography) on the ChG layers, annealed near the glass-transition temperature, by the simultaneous exposure and selective etching of such layers. The possible mechanism of photo-induced etching of ChG films is discussed.

Keywords: Photoinduced etching, chalcogenide photoresist, interference lithography.

1. Mizushima Y., Yoshikawa A. Photoprocessing and lithographic applications / Ed. Y. Hamakawa // *Amorphous Semiconductors Technol. and Devices*. — OHM, Tokyo; North-Holland, Amsterdam, 1982. — P. 277–295.
2. High resolution electron beam lithography with negative and inorganic resists / G.H. Bernstein, W.P. Liu, Y.N. Khawaja et al. // *J. Vac. Sci. Technol.* — 1988. — **B6**, N 6. — P. 2298–2307.
3. Saito K., Utsugi Y., Yoshikawa A. X-ray lithography with Ag-Se/Ge-Se inorganic resist using synchrotron radiation // *J. Appl. Phys.* — 1988. — **63**, N 2. — P. 565–567.
4. Sean H. Wong, Michael Thiel, Peter Brodersen et al. Highly Selective Wet Etch for High-Resolution Three-Dimensional Nanostructures in Arsenic Sulfide All-Inorganic Photoresist // *Chem. Mater.* — 2007. — **19** (17). — P. 4213–4221.
5. *Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл—полупроводник* / И.З. Индутный, М.Т. Костышин, О.П. Касярум и др. — Киев: Наук. думка, 1992. — 240 с.
6. *Photo-Induced Metastability in Amorphous Semiconductors* / Ed. by A.V. Kolobov. — New York: Wiley, 2003.
7. Данько В.А., Индутный И.З., Минько В.И. и др. Эффект фототравления в тонких слоях халькогенидных стеклообразных полупроводников // *ФТП*. — 2012. — **46**, вып. 4. — С. 520–524.
8. *Штексельмахер*. Пленочная микроэлектроника / Под ред. Л. Холленда. — М.: Мир, 1968.

9. Пат. 2008285 РФ, МКИ5 С 03 С 15/00, 23/00. Раствор для негативного травления халькогенидных стекол / И.З. Индутный, С.А. Костюкевич, П.Е. Шепелявый. — Оpubл. 1994. Открытия, изобр. № 4.
10. Данько В.А., Индутный И.З., Минько В.И., Шепелявый П.Е. Интерференционная фотолитография с использованием резистов на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников // Автометрия. — 2010. — **46**, № 5. — С. 103—112.
11. Зенкин С.А., Мамедов С.Б., Михайлов М.Д. и др. Механизм взаимодействия монокристаллических стекол и аморфных пленок системы As—S с растворами аминов // Физика и химия стекла. — 1997. — **23**, вып. 1. — С. 560—568.
12. Chern G.C., Lauks I. Spin coated amorphous chalcogenide films: Thermal properties // J. Appl. Phys. — (1983). — **54**, N 8. — С. 4596—4601.
13. Orava J., Wagner T., Krbal M. et al. Selective dissolution of $\text{Ag}_x(\text{As}_{0.33}\text{S}_{0.67-y}\text{Se}_y)_{100-x}$ chalcogenide thin films // J. Non-Crystalline Solids. — 2008. — **354**. — P. 533—539.
14. Kolobov A.V., Tanaka K. Nanoscale mechanism of photo-induced metastability and reversible photodarkening in chalcogenide vitreous semiconductors / ФТП. — 1998. — **32**, № 8. — С. 899—904.
15. Ganjoo Ashtosh, Jain H., Khalid S. Atomistic observation of photo-expansion and photo-contraction in chalcogenide films by in situ EXAFS / J. Non-Crystalline Solids. — **354**. — P. 2673—2678.
16. Trunov M.L., Lytvyn P.M., Nagy P.M., Dyachyn's'ka O.M. Real-time atomic force microscopy imaging of photoinduced surface deformation in $\text{As}_x\text{Se}_{100-x}$ chalcogenide films // Appl. Phys. Lett. — 2010. — **96**. — P. 111908.
17. Tanaka K., Kawakami N., Odajima A. Photoinduced Elastic Changes in Amorphous As_2S_3 Films // Jpn. J. Appl. Phys. — 1981. — Part 1, **20**, N 12. — P. L874—L876.
18. Kolobov Alexander, Tanaka Kazunobu. Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices / Ed. by H.S. Nalwa. — San Diego: Academic, 2001. — **5**, chap. 2.
19. Fritzsche H. Photo-induced fluidity of chalcogenide glasses // Solid State Commun. — 1996. — **99**, N 3. — P. 153—155.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова
НАН України
Проспект Науки, 41
03028 Київ
E-mail: danko-va@ukr.net

Отримано 14.03.2012