

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

ФОРМУВАННЯ СУБМІКРОННИХ ПЕРІОДИЧНИХ ПЛАЗМОННИХ СТРУКТУР ВЕЛИКОЇ ПЛОЩІ МЕТОДОМ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНОЇ ЛІТОГРАФІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАКУУМНИХ ФОТОРЕЗИСТІВ

У даній роботі наведено можливості використання інтерференційної літографії з фоторезистами на основі халькогенідних скловидних напівпровідників у комплексі з термічною обробкою для формування однорідних плазмонних структур з необхідними характеристиками на підкладках великої площі. У результаті досліджень було підтверджено наявність поверхневих плазмон-поляритонних і локальних поверхневих плазмонних резонансів на виготовлених зразках, які можуть контролюватися в широких межах вибором геометричних параметрів структур і технологічними режимами їх виготовлення.

Ключові слова: плазмонні структури, поверхневі плазмон-поляритонні хвилі, локальні поверхневі плазмони, халькогенідні фоторезисти, інтерференційна літографія.

ВСТУП

В останні роки увагу багатьох дослідників привернули металеві плазмонні структури, які відіграють важливу роль у численних дослідженнях та застосуваннях, зокрема, як підкладки для оптичних сенсорів на основі плазмонного резонансу [1] чи для поверхнево-підсиленого комбінаційного розсіяння [2], як субхвильові оптичні елементи [3] та ін. Такі структури формуються за допомогою сучасних літографічних технологій: електронно-променевої чи іонно-променевої літографії [4, 5], наносферної літографії [6], нанощампування [7, 8], оптичної літографії в далекій ультрафіолетовій області [9] та інших достатньо затратних технологічних процесів. У результаті вартість таких структур є надто високою, що обмежує можливість їх широкого використання.

У той же час більш простою і технологічною є інтерференційна літографія (ІЛ), яку можна використати для формування впорядкованих металевих наноструктур [10, 11]. Суттєвою перевагою ІЛ є можливість за допомогою однієї експозиції інтерференційним полем лазерного випромінювання швидко формувати ідеально періодичну структуру на великій площі, яка обмежується лише інтенсивністю та довжиною когерентності лазера. Як правило, це десятки, а то й сотні квадратних сантиметрів. Для електронної та іонної літографії площа одноразового експонування становить не більше декількох сотень квадратних мікрометрів. Для нанощампування потрібно попередньо виготовити штамп за допомогою тієї ж електронно-променевої літографії, що є досить тривалим та затратним процесом. Крім того, такі штампи витримують не більше 100 відбитків [12]. І навіть для наносферної літографії за рахунок ненульової дисперсії розмірів наносфер сформована двовимірна структура розділяється на дещо відмінні домени з розмірами меншими за 100 нм.

У попередніх дослідженнях авторів було показано, що ІЛ з використанням високороздільного халькогенідного фоторезисту є перспективною технологією для формування одно- та двовимірних субмікронних періодичних структур на поверхні напівпровідників та діелектриків [10, 13]. Халькогенідні фоторезисти на основі осаджених у вакуумі

© В.А. Данько, М.Л. Дмитрук, І.З. Індутний, С.В. Мамикін, В.І. Минько,
П.М. Литвин, М.В. Луканюк, П.Є. Шепелявий, 2015

за допомогою термічного випаровування аморфних плівок халькогенідного скла (ХС) характеризуються високою роздільною здатністю, оптичною однорідністю, широким спектральним діапазоном світлочутливості [14, 15]. Крім того, такі фоторезисти мають високий показник заломлення (у межах від 2,0 до 3,0) і є перспективними для імерсійної літографії, в тому числі імерсійної ІЛ. Фотостимульовані зміни в осаджених у вакуумі плівках ХС мають три компоненти: реверсивну, неререверсивну та перехідну, яка проявляється лише під час опромінення фоторезисту [15, 16]. Використання халькогенідних плівок як фоторезистів традиційно було пов'язано саме з неререверсивною зміною їх розчинності, яка проявляється в термічно-осаджених шарах халькогенідів миш'яку. У недавніх роботах авторів [17, 18] було показано можливість реалізації ІЛ також на реверсивних і перехідних фотостимульованих структурних змінах плівок ХС.

Дана робота присвячена дослідженню процесів формування одновимірних (граток) та двовимірних (біграток) періодичних металевих структур на поверхні скляних пластин з використанням ІЛ та халькогенідних фоторезистів. У роботі також вивчається вплив термічних обробок на морфологічні характеристики та особливості збудження поверхневих плазмонів у субмікронних періодичних структурах золота.

ЕКСПЕРИМЕНТ

Зразки для досліджень готували шляхом послідовного термічного випаровування у вакуумі $2 \cdot 10^{-3}$ Па та осадження на підкладки адгезійного шару Ст товщиною 3 нм, шару металу (Au, Al) з товщиною 20–120 нм і шарів ХС (As_2S_3 чи $GeSe_3$) з товщинами від 50 до 300 нм. Як підкладки використовували поліровані скляні пластини розміром до 50×50 мм. Контроль товщини під час нанесення плівок здійснювався за допомогою кварцового вимірювача товщини (КИТ-1), а після осадження – мікроінтерферометра МІІІ-4. Після осадження деякі зразки відпалювались при температурі від $(T_g - 15)$ до $(T_g - 5)$ °С, де T_g – температура розм'якшення даного халькогеніду (0,5–2 год).

Запис інтерференційних структур на відпалених плівках ХС здійснювався за допомогою інтерференційної картини від випромінювання гелій-кадмієвого лазера (довжина хвилі $\lambda = 440$ нм) із заданою просторовою частотою. Величина експозиції при запису ґраток (1D структури) становила $0,2\text{--}0,5$ Дж/см², і при запису біграток (2D структури) кожна експозиція зменшувалась у 1,3–1,5 рази. Двовимірні періодичні структури формувались за допомогою подвійного експонування з поворотом зразка між експозиціями на 90° навколо нормалі. Після експонування за допомогою обробки в селективному протравлювачі на основі амінів формувалась літографічна маска, крізь яку травили плівку металу. Після видалення в розчині лугу залишків фоторезисту, промивання та висушування отримували сформовану металеву періодичну структуру.

Для визначення форми профілю рельєфних елементів періодичної структури і їх розмірів використовували мікроскоп атомних сил Dimension 3000 Scanning Probe Microscope фірми Digital Instruments.

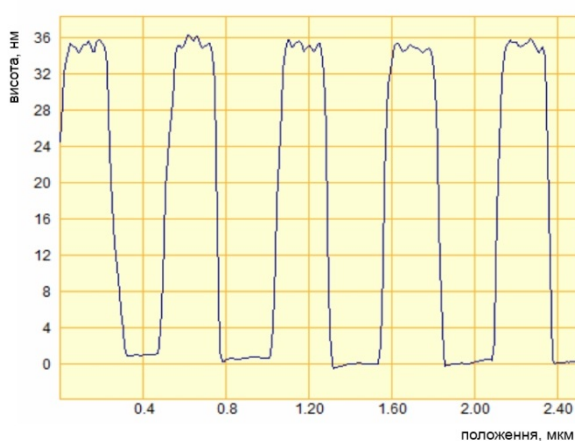
Оптичні властивості виготовлених 1D і 2D структур вивчали з допомогою вимірювання спектрів і кутових залежностей пропускання та відбивання поляризованого світла в діапазоні довжин хвиль $0,4\text{--}1,1$ мкм та кутів падіння $10\text{--}80^\circ$. Автоматизована установка для проведення таких вимірювань складається з освітлювача, механічного модулятора світла, монохроматора, на виході якого встановлена призма Глана, обертального столика для зразків. Інтенсивність відбивання або пропускання світла вимірюється кремнієвим фотодетектором, сигнал з якого після підсилення і демодуляції подається на вхід аналого-цифрового перетворювача. Такі спектрометричні вимірювання при кількох кутах падіння світла дозволяють побудувати дисперсійні залежності збуджуваних оптичних мод та ідентифікувати їх природу.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

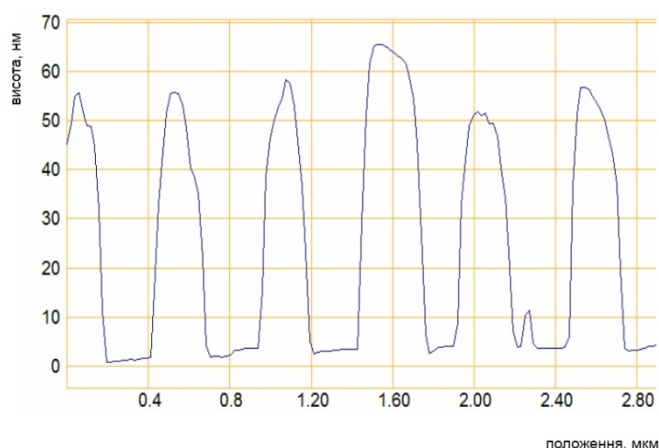
При формуванні халькогенідної літографічної маски в процесі ІЛ велику роль грає оптимізація процесу експонування та післяекспозиційної обробки фоторезисту. Тому, щоб отримати маску з заданими параметрами, необхідно вибрати оптимальну товщину фоторезисту, час експонування, селективність протравлювача та час травлення фоторезисту. У технології ІЛ застосовується режим невеликого переекспонування фоторезисту, щоб забезпечити циклоїдну форму профілю штрихів періодичної халькогенідної маски. Змінюючи час селективного травлення фоторезисту, можна змінювати ширину елементів літографічної маски і відповідно ширину відкритих інтервалів між елементами маски, крізь які відбувається подальше травлення металевого шару. Травлення фоторезисту контролювалось *in situ* з допомогою реєстрації нефотоактивного довгохвильового світла, дифрагованого від рельєфної структури, яка формується в шарі фоторезисту.

Були проведені дослідження процесів формування періодичних Al та Au структур для просторових частот у межах від 600 до 3500 мм^{-1} . Встановлено, що для заданої фоторезистивної маски форма профілю і шпаруватість (відношення ширини до періоду) елементів періодичної структури, отриманої внаслідок рідинного травлення металевого шару крізь маску, будуть визначатись швидкістю і часом травлення. Збільшення часу травлення приводить до зменшення ширини штриха ґратки чи елемента двовимірної структури (при значному «перетравлюванні» зменшується і його висота), а форма перерізу змінюється від трапецієподібної (близької до прямокутної) до трикутної.

Ще одним методом контролю профілю елементів металевих структур є термічна обробка (відпал) вже сформованих зразків. Найбільш яскраво вплив відпалу проявляється на плазмонних структурах на основі золота. У роботі [19] детально досліджувалися зразки термічно осаджених у вакуумі шарів золота з ефективною товщиною від 1 до 12 нм, зокрема, вплив відпалу на повітрі в інтервалі температур від 250 до 450 °C на морфологічні та оптичні властивості розупорядкованих нанострівців Au. Встановлено, що в інтервалі температур 350–450 °C формуються нанострівці Au сферичної та еліпсоїдальної форм, причому процес формування наночастинок визначається, в основному, величиною температури і мало залежить від часу відпалу зразка.



а



б

Рис. 1. АСМ зображення профілю перерізу Au ґратки з періодом 500 нм до (а) та після відпалу при температурі 400 °C протягом 15 хв (б).

У даній роботі досліджували вплив відпалу у вакуумі в інтервалі температур від 350 до 450 °С періодичних 1D та 2D структур золота, сформованих методом ІЛ з використанням халькогенідних фоторезистів. Встановлено, що оптимальною температурою для наших зразків з товщинами Au від 30 до 60 нм є 400 °С – при нижчих температурах вплив відпалу недостатній для суттєвої морфологічної трансформації, а при 450 °С починається утворення агломератів елементів структури та її розупорядкування.

На рис. 1а показано профіль перерізу Au ґратки (отриманий за допомогою АСМ) з періодом 500 нм, сформованої методом ІЛ на скляній підкладці. Шпаруватість структури близька до 50%, товщина шару золота 35 нм, форма штриха трапецієподібна, навіть близька до прямокутної. На рис. 1б показано зображення та профіль штрихів цієї ж ґратки після відпалу у вакуумі при температурі 400 °С протягом 15 хв. Помітні суттєві зміни у формі профілю штрихів, які відбулися внаслідок відпалу. Трапецієподібний профіль з плоскою поверхнею штриха трансформувалася у випуклий з меншою півшириною та більшою висотою. Дослідження гістограми висот ґратки показало, що початкова висота штриха 35 ± 2 нм внаслідок відпалу зросла до 54 ± 10 нм. Тобто плоскі наносмужки Au внаслідок відпалу під дією сил поверхневого натягу трансформувались у півциліндричні нанодропи.

Ще більший вплив термічного відпалу спостерігається на двовимірні впорядковані плазмонні структури. На рис. 2а показано профіль перерізу Au біґратки з тим же періодом 500 нм, сформованої методом ІЛ за допомогою подвійного експонування. Форма елементів цієї бінарної періодичної структури близька до деформованих циліндрів з плоскими вершинами.

На рис. 2б показано, як змінюються ці елементи в результаті відпалу у вакуумі при 400 °С протягом 15 хв. Циліндрична форма трансформувалася у куполоподібну з меншою півшириною та значно більшою висотою. Початкова висота елемента 34 ± 2 нм зросла внаслідок відпалу аж до 64 ± 12 нм. Це помітно більше, ніж для ґраток, тому що в даному випадку «стягування» Au острівця відбувається у двох вимірах, на відміну від ґратки, де процес одновимірний.

Зміна морфологічних характеристик плазмонних структур внаслідок відпалу відображається і в їх оптичних характеристиках, наведених на рисунках 3 і 4.

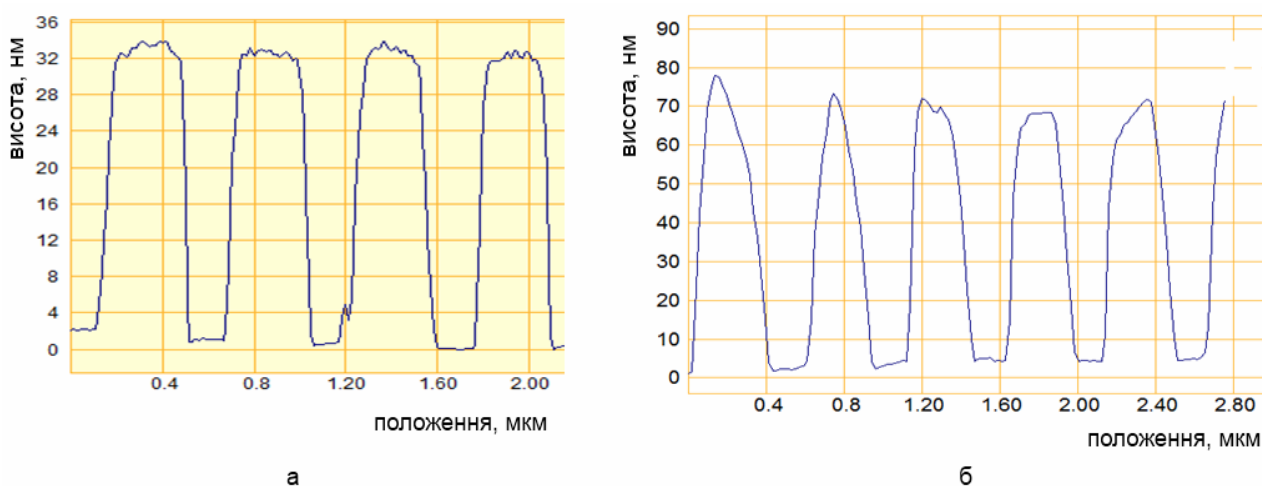


Рис. 2. АСМ зображення профілю перерізу періодичної бінарної Au структури з періодом 500 нм до (а) та після відпалу при температурі 400 °С (б).

Спектрально-кутове положення резонансного максимуму перетворення випромінювання у поверхневі плазмон-поляритонні хвилі (ПППХ) визначається умовою узгодження компонент хвильових векторів падаючого випромінювання та ПППХ, паралельних поверхні поділу між металом та неметалевим середовищем (умова збереження квазіімпульсу) [20, 21]:

$$k \sin \theta + m\mathbf{G} = k_{III}, \quad (1)$$

де $k = 2\pi/(\lambda/n)$ – хвильовий вектор падаючого випромінювання з довжиною хвилі λ у вакуумі, θ – кут падіння світла; m – ціле число ($m \neq 0$); $\mathbf{G} = 2\pi/a$ – обернений вектор ґратки з періодом a , $\varepsilon = n^2$ – діелектрична проникність та показник заломлення оточуючого середовища, k_{III} – хвильовий вектор ПППХ.

Для приблизної оцінки величини хвильового вектора ПППХ можна застосувати вираз, отриманий для випадку плоскої межі поділу напівнескінченних середовищ [20]:

$$k_{III} = \pm \left(\frac{2\pi}{\lambda/n} \right) \left(\frac{\varepsilon_{Me} \varepsilon}{\varepsilon_{Me} + \varepsilon} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

де k_{III} має знак «+» при $m > 0$, «-» при $m < 0$. Тут $\varepsilon_{Me} = \varepsilon'_{Me} + i\varepsilon''_{Me} = (n + ik)^2$ – комплексна діелектрична проникність металу на довжині хвилі λ .

Застосувавши вирази (1), (2), можна побудувати дисперсійні залежності ПППХ, що збуджуються на межах поділу метал/повітря та метал/підкладка в координатах «Кут збудження» від «Довжини хвилі», що подано на рисунках 3, 4. Для розрахунків використано оптичні константи золота з [22], а показник заломлення підкладки $n_s = 1.48$. Для даної геометрії ґраток і оптичних констант є можливим збудження мод з $m = +1$ ($1, 1s$), $m = +2$ ($2, 2s$), $m = -1$ ($1', 1s'$), $m = -2$ ($2', 2s'$) на межі поділу повітря/золото ($1, 1', 2, 2'$) та золото/підкладка ($1s, 1s', 2s, 2s'$).

Особливістю збудження локальних поверхневих плазмонів (ЛПП) у періодичному масиві нанодротів, якими є досліджувані дифракційні ґратки, є слабка залежність спектрального положення від кута падіння світла [23], що зумовлена, в основному, кутовою залежністю ширини проєкції нанодроту в площині хвильового вектора світла.

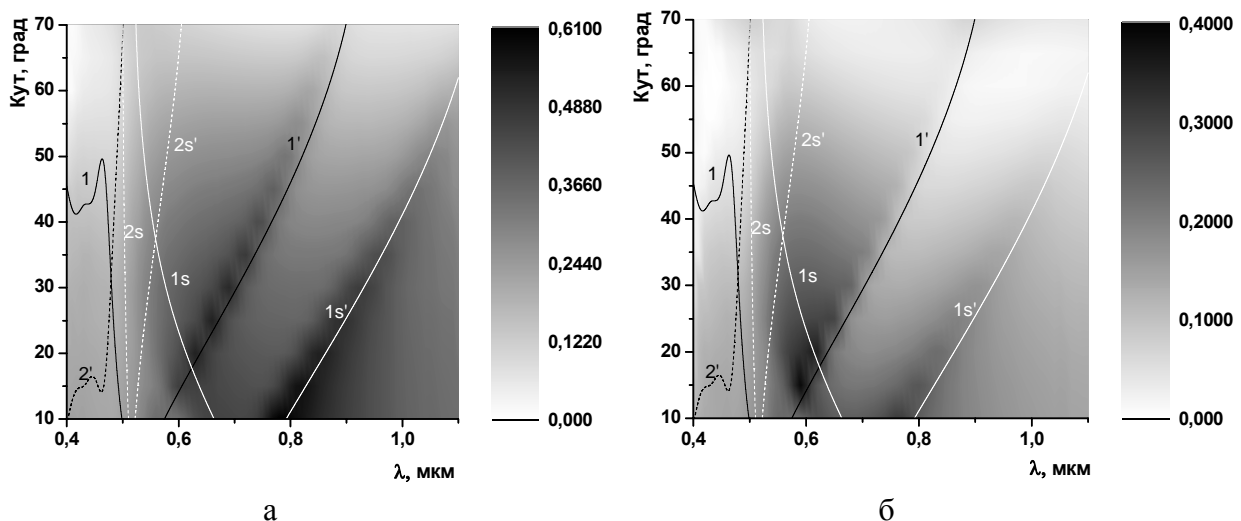


Рис. 3. Спектрально-кутова залежність відбивання світла невідпаленою (а) та відпаленою при температурі 400 °С протягом 15 хв (б) Au ґраткою з періодом 500 нм, на яку накладено розраховані дисперсійні залежності поверхневих плазмон-поляритонних мод на межі повітря/золото ($1, 1', 2'$), золото/підкладка ($1s, 1s', 2s, 2s'$) для $m = +1$ ($1, 1s$), $m = +2$ ($2s$), $m = -1$ ($1', 1s'$) та $m = -2$ ($2s'$) порядків дифракції.

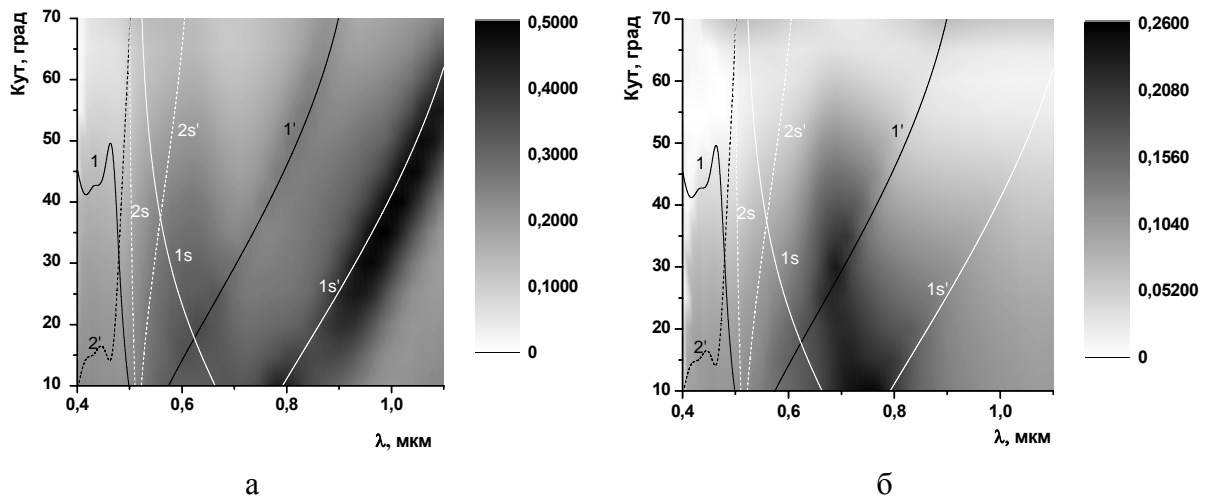


Рис. 4. Спектрально-кутова залежність відбивання світла невідпаленою (а) та відпаленою при температурі 400 °С протягом 15 хв (б) періодичною бінарною Au структурою з періодом 500 нм, на яку накладено розраховані дисперсійні залежності поверхневих плазмон-поляритонних мод на межі повітря/золото ($I, I', 2'$), золото/підкладка ($1s, 1s', 2s, 2s'$) для $m = +1$ ($I, 1s$), $m = +2$ ($2s$), $m = -1$ ($I', 1s'$) та $m = -2$ ($2s'$) порядків дифракції.

Для оцінки верхньої високочастотної границі спектрального положення ЛПП можна скористатись формулою для поляризованості α сферичної металеві наночастинки в діелектричному оточенні [24]:

$$\alpha = \frac{(\epsilon_{Me}/\epsilon) - 1}{(\epsilon_{Me}/\epsilon) + 2}, \quad (3)$$

яка для випадку золотої наночастинки у вакуумі сягає максимуму в околі $\lambda \sim 0.5$ мкм. При збільшенні розміру наночастинки (ширини нанодроту) та діелектричної проникності оточення резонансна довжина хвилі може суттєво збільшуватись [8] і сягати інфрачервоної області спектра. Вона також збільшується, якщо в близькому оточенні знаходяться інші металеві наночастинки, за рахунок взаємодії між ними.

Найбільш інтенсивно збуджуються поверхневі плазмон-поляритонні хвилі з $m = -1$ на невідпалених зразках одновимірних дифракційних ґраток ($I', 1s'$, рис. 3а) внаслідок того, що краї гребенів ґратки (нанодротів) розташовані ближче один до одного і ПППХ зустрічає менший опір при поширенні вздовж поверхні. Внаслідок суттєвої площі контакту між нанодротоми і підкладкою для невідпалених зразків, є інтенсивною мода, що збуджується на межі золото-підкладка (мода $1s'$ на рис. 3а). Збудження ЛПП є малопомітним на фоні інтенсивної ПППХ. Після відпалу, за рахунок збирання золота в більш компактні структури і, як наслідок, збільшення відстаней між краями нанодротів або наноточок, інтенсивність ПППХ зменшується, особливо зменшується мода $1s'$, у той час як мода I' (що збуджується на межі золото/повітря) залишається помірно інтенсивною (рис. 3б). Після відпалу на фоні суттєвого зменшення інтенсивності ПППХ збільшується інтенсивність ЛПП, що найбільш яскраво видно на відпаленій 2D структурі (рис. 4б) в області $\lambda = 0.6\text{--}0.8$ мкм.

ВИСНОВКИ

Показано, що технологія ІЛ з використанням вакуумних халькогенідних фоторезистів у комплексі з додатковою термічною обробкою дозволяє формувати однорідні плазмонні структури з необхідними характеристиками (просторовою частотою, глибиною рельєфу, формою профілю елементів) на підкладках великої площі (до 25 см²). Зокрема, для даного лазера просторову частоту сформованих періодичних металевих структур можна

змінювати в межах від 600 до 3500 nm^{-1} . Вимірювання кутових та спектральних залежностей відбивання та пропускання світла на виготовлених зразках підтверджують наявність поверхневих плазмон-поляритонних і локальних поверхневих плазмонних резонансів, положення та характеристики яких узгоджуються з передбаченнями теорії і можуть контролюватися в широких межах вибором геометричних параметрів структур і технологічними режимами їх виготовлення.

Результати виконаних досліджень показують, що ця технологія може успішно використовуватись для швидкого виготовлення та оптимізації бездефектних плазмонних структур великих розмірів.

**V.A. Dan'ko, M.L. Dmytruk, I.Z. Indutnyi, S.V. Mamykin, V.I. Myn'ko,
P.M. Lytvyn, M.V. Lukaniuk, P.E. Shepeliavyi**

FORMATION OF SUBMICRON PERIODIC PLASMON STRUCTURES OF LARGE AREA BY USING THE INTERFERENCE LITHOGRAPHY METHOD WITH VACUUM PHOTORESISTS

This paper shows the possibility of using interference lithography with photoresists based on chalcogenide glassy semiconductors in combination with heat treatment to form homogeneous plasmon structures with desired characteristics for large area substrates. As a result of our investigations, it has been confirmed the presence of the surface plasmon polariton and local surface plasmon resonances in the prepared samples that can be controlled in a wide range by selection of geometric parameters of structures and technological modes of their production.

Keywords: plasmon structures, surface plasmon polariton waves, local surface plasmons, chalcogenide photoresists, interference lithography.

1. *Stewart M.E., Anderton C.R., Thompson L.B. et al.* Nanostructured plasmonic sensors // *Chem. Rev.* – 2008. – **108**, No.2. – P. 494-521.
2. *Jin M.L., Pully V., Otto C., van den Berg A., and Carlen E.T.* High-density periodic arrays of self-aligned subwavelength nanopillars for surface-enhanced Raman spectroscopy // *J. Phys. Chem. C.* – 2010. – **114**, No.50. – P. 21953-21959.
3. *Paivanranta B., Baroni P., Scharf T. et al.* Antireflective nanostructured microlenses // *Microelectron. Eng.* – 2008. – **5**. – P. 1089-1091.
4. *Cattoni A., Cambril E., Decanini D., Faini G., Haghiri-Gosnet A.M.* Soft UV-NIL at 20 nm scale using flexible bi-layer stamp casted on HSQ master mold // *Microelectron. Eng.* – 2010. – **87**. – P. 1015-1018.
5. *Fu Y., Kok N., Bryan A., Zhou W.* Quasi-direct writing of diffractive structures with a focused ion beam // *Opt. Exp.* – 2004. – **12**, No.9. – P. 1803.
6. *Zhang X.Y., Whitney A.V., Zhao J., Hicks E.M., and Van Duyne R.P.* Advances in contemporary nanosphere lithographic techniques // *J. Nanosci. Nanotechnol.* – 2006. – **6**, No.7. – P. 1920-1934.
7. *Chuang S.Y., Chen H.L., Kuo S.S., Lai Y.H., Lee C.C.* Using direct nanoimprinting to study extraordinary transmission in textured metal films // *Opt. Exp.* – 2008. – **16**, No.4. – P. 2415.
8. *Дмитрук М.Л., Малинич С.З.* Поверхневі плазмонні резонанси та їх прояв у оптичних властивостях наноструктур благородних металів // *Укр. фіз. журн. Огляди.* – 2014. – **9**, №1. – С. 3-37.
9. *Brizuela F., Wang Y., Brewer C.A. et al.* Microscopy of extreme ultraviolet lithography masks with 13.2 nm tabletop laser illumination // *Opt. Lett.* – 2009. – **34**, No.3. – P. 271-273.
10. *Данько В.А., Индутный И.З., Минько В.И., Шепелявий П.Е.* Интерференционная фотолитография с использованием резистов на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников // *Автометрия.* – 2010. – **46**, № 5. – С. 103-112.
11. *Vala M. and Homola J.* Flexible method based on four-beam interference lithography for fabrication of large areas of perfectly periodic plasmonic arrays // *Opt. Exp.* – 2014. – **22**, No.15. – P. 18778-18789.
12. *Zankovych S., Hoffmann T., Seekamp J., Bruch J.U., Sotomayor-Torres C.M.* Nanoimprint lithography: challenges and prospects // *Nanotechnology.* – 2001. – **12**, No.2. – P. 91-95.

13. *Индутный И.З., Минько В.И., Шепелявий П.С. та ін.* Формування фотонних наноструктур за допомогою інтерференційної літографії та осадження у вакуумі під кутом // Оптоелектроника и полупроводниковая техника. – 2011. – вып. 46. – С. 47-54.
14. *Wong Sean H., Thiel Michael, Brodersen Peter et al.* Wet etch for high-resolution three-dimensional nanostructures in arsenic sulfide all-inorganic photoresist // Chem. Mater. – 2007. – **19**, No.17. – P. 4213-4221.
15. *Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл-полупроводник* / И.З. Индутный, М.Т. Костышин, О.П. Касярум и др. – Киев: Наук. думка. – 1992.
16. *Kolobov A.V., Tanaka K.* Nanoscale mechanism of photo-induced metastability and reversible photodarkening in chalcogenide vitreous semiconductors // Физика и техника полупроводников. – 1998. – **32**, № 8. – С. 899-904.
17. *Данько В.А., Индутный И.З., Минько В.И. и др.* Эффект фототравления в тонких слоях халькогенидных стеклообразных полупроводников // Физика и техника полупроводников. – 2012. – **46**, вып. 4. – С. 520-524.
18. *Dan'ko V.A., Indutnyi I.Z., Min'ko V.I. et al.* Interference photolithography using photoetching effect in chalcogenide films // J. Non-Oxide Glasses. – 2012. – **3**, No.2, P. 13-18.
19. *Yukhymchuk V.O., Kostyukevych S.A., Dzhagan V.M. et al.* SERS of Rhodamine 6G on substrates with laterally ordered and random gold nanoislands // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2012. – **15**, No.3. – P. 232-238.
20. *Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Стрижевский В.Л.* Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. – Киев: Наук. думка. – 1989.
21. *Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред* / Под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллса. – М.: Наука. – 1985.
22. *Johnson P.B. and Christy R.W.* Optical Constants of the Noble Metals // Phys. Rev. B. – 1972. – **6**. – P. 4370-4379.
23. *Sosnova M.V., Dmitruk N.L., Korovin A.V., Mamykin S.V.* Local plasmon excitations in one-dimensional array of metal nanowires for sensor applications // Appl. Phys. B: Lasers and Optics, Springer. – 2010. – **99**. – P. 493-497.
24. *Bohren C.F., Huffman D.R.* Absorption and Scattering of Light by Small Particles. – New York: Wiley Intersci. – 1998.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
проспект Науки, 41,
03680 Київ, Україна
e-mail: danko-va@ukr.net

Отримано 16.06.2015