

І.З. ІНДУТНИЙ, Ю.В. УШЕНІН, В.І. МИНЬКО, П.Є. ШЕПЕЛЯВИЙ,
М.В. ЛУКАНЮК, А.А. КОРЧОВИЙ, Р.В. ХРИСТОСЕНКО

Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України
(Просп. Науки, 41, Київ 03680; e-mail: indutnyy@isp.kiev.ua)

НАНОСТРУКТУРОВАНІ Au ЧПІ З ПІДВИЩЕНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ДЛЯ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ

УДК 681.586.5 +
+ 681.785.552 + 776

В роботі проведені дослідження підвищення чутливості поверхневого плазмонного резонансу рефрактометра за рахунок формування періодичного рельєфу у вигляді ґратки з субмікронним періодом на поверхні Au чіпа. Періодичний рельєф різної глибини з просторовою частотою $\nu = (3370 \pm 5)$ лін./мм було сформовано на поверхні плівки Au за допомогою інтерференційної літографії з використанням вакуумних халькогенідних фоторезистів. Встановлено, що кратність підвищення чутливості рефрактометра та величина інтервалу зміни показника заломлення Δn середовища, в якому спостерігається це підвищення, залежить від глибини рельєфу ґратки. При збільшенні глибини рельєфу ширина робочого інтервалу Δn зменшується, а чутливість збільшується від 110 град./RIU для стандартного чіпа, до 154 град./RIU та 363 град./RIU для структурованих чіпів з глибиною рельєфу, що дорівнює $11,7 \pm 2$ нм та $18,5 \pm 2$ нм відповідно.

Ключові слова: поверхневий плазмонний резонанс, біосенсиори, інтерференційна літографія, вакуумні халькогенідні фоторезисти.

1. Вступ

Можливість використання явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР) для сенсорики було продемонстровано в 1982 р. [1]. З того часу спостерігається бурхливий розвиток досліджень та розробок сенсорів на основі ППР завдяки їх високій чутливості, можливості швидко, *in situ*, детектувати процеси в середовищі біля поверхні металевої плівки. ППР сенсори застосовуються для вимірювання різних фізичних та хімічних величин, включаючи електричне поле [2], тиск [3], концентрацію газів [1], та ін. Але найбільш широке поле застосування вони отримали в ролі біосенсорів [1] для вивчення біомолекуляр-

них взаємодій [4], медичної діагностики [5], аналізів продуктів харчування та оточуючого середовища [6, 7].

У більшості серійних ППР приладів для збудження поверхневих плазмонних хвиль використовується повне внутрішнє відбивання в призмі (метод Кречмана) [8]. Але такі біосенсиори все ж мають певні недоліки, зокрема їх чутливість недостатня для того, щоб надійно детектувати взаємодію протеїнів з лігандами малих розмірів [9]. Тому підвищення чутливості ППР сенсорів є актуальним завданням, над яким працюють багато дослідників. Останніми роками було запропоновано ряд модифікацій тонкопліткових структур на основі шарів золота, які використовуються в ролі чіпів ППР сенсорів, зокрема, нанесення наночастинок чи нанодротин золота на поверхню плівок Au [10, 11], нанесення тонкого діелектричного шару, який мі-

© І.З. ІНДУТНИЙ, Ю.В. УШЕНІН, В.І. МИНЬКО,
П.Є. ШЕПЕЛЯВИЙ, М.В. ЛУКАНЮК,
А.А. КОРЧОВИЙ, Р.В. ХРИСТОСЕНКО, 2017

ISSN 2071-0194. Укр. фіз. журн. 2017. Т. 62, № 5

стить наночастинки золота на поверхню Au чіпа [12], та ін.

У теоретичних дослідженнях [13] було показано, що формування періодичної ґратки на поверхні металевому шару чіпа ППР біосенсора, який працює в схемі Кречмана, може в декілька разів підвищити чутливість приладу, порівняно із стандартними чіпами з плоскими металевими поверхнями. Поверхневий плазмон збуджується в напрямку, перпендикулярному штрихам ґратки і може зазнавати відбивання в зворотному напрямку. Якщо період ґратки підбрано таким чином, щоб задовольнялись умови брегівського відбивання, то поширення поверхневих плазмонів заборонено (формується заборонена зона). Вибравши робочу зону сенсора в околі забороненої зони (шляхом зміни частоти ґратки та глибини рельєфу), можна отримати підвищену чутливість положення плазмонного максимуму від зміни показника заломлення середовища біля поверхні чіпа порівняно з плоскими Au шарами.

Періодичні рельєфні наноструктури формуються за допомогою сучасних літографічних технологій: електронно-променевої чи іонно-променевої літографії [14, 15], наносферної літографії [16], наоштампування [17], оптичної літографії в далекій ультрафіолетовій області [18] та інших достатньо затратних технологічних процесів. В результаті вартість таких структур є занадто високою, що ставить під сумнів можливість їх широкого використання. В той самий час більш дешевою і технологічною є інтерференційна літографія (ІЛ), яку можна використати для формування впорядкованих металевих наноструктур [19, 20]. 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. В попередніх дослідженнях авторів було показано, що ІЛ з використанням високороздільного вакуумного фоторезисту на основі халькогенідних стекел (ХС) є перспективною технологією для формування одно- та двовимірних субмікронних періодичних структур на поверхні металевих плівок, напівпровідників та діелектриків [21, 22].

У попередній нашій роботі було вперше експериментально продемонстровано можливість підви-

щення чутливості ППР сенсора, який працює в схемі Кречмана, за допомогою формування періодичного рельєфу на поверхні Au чіпа [23]. В даній роботі проведені більш детальні дослідження умов збудження плазмонів у плівках з рельєфною поверхнею у вигляді високочастотних ґраток, та зміни їх оптичного відгуку залежно від глибини рельєфу.

2. Експеримент

Зразки для досліджень готували шляхом послідовного термічного випаровування у вакуумі 2×10^{-3} Па та осадження на підкладки адгезивного шару Cr товщиною 3 нм, шару металу (Au) з товщиною 40–50 нм і шарів ХС ($As_{40}S_{60}$ чи $As_{40}S_{40}Se_{20}$) з товщинами від 80 нм до 100 нм. У ролі підкладок використовувались поліровані пластини зі скла Ф1 (показник заломлення $n = 1,615$) розміром $20 \times 20 \times 1$ мм. Контроль товщин під час нанесення плівок здійснювався за допомогою кварцевого вимірювача товщини (КИТ-1), після осадження загальна товщина тонкоплівкової структури вимірювалась за допомогою мікроінтерферометра МІИ-4.

Запис інтерференційних структур на плівках ХС здійснювався за допомогою інтерференційної картини від випромінювання гелій-кадмієвого лазера (довжина хвилі $\lambda = 441,6$ нм) з заданою простою частотою. Величина експозиції при запису ґраток становила 0,2–0,5 Дж/см². Після експонування за допомогою обробки в селективному протравлювачі на основі амінів формувалась літографічна маска, через яку травилась плівка металу. Травлення фоторезисту контролювалось *in situ* за допомогою реєстрації нефотоактивного довгохвильового світла, дифрагованого від рельєфної структури, яка формується в шарі фоторезисту. Після видалення в розчині луґу залишків фоторезисту, промивання та висушування отримували сформовану металеву періодичну структуру.

Періодична структура формувалась лише на одній половині чіпа, друга половина залишалась покритою неструктурованою плівкою золота. Такі зразки готувались для проведення порівняльних досліджень на двоканальному приладі. В роботі був використаний розроблений в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України двоканальний ППР рефрактометр ПЛАЗМОН-

71 в конфігурації Кречмана, джерелом випромінювання в якому є напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі 850 нм.

Для визначення форми профілю рельєфних елементів періодичної структури і їх розмірів використовувався мікроскоп атомних сил Dimension 3000 Scanning Probe Microscope (Digital Instruments Inc., Tonawanda, NY, USA). Просторова частота ґраток визначалась за допомогою оптичного стенда на основі гоніометра Г5М з точністю ± 5 лін./мм.

3. Результати та їх обговорення

ППР рефрактометр ПЛАЗМОН-71 дозволяє вимірювати кутові залежності інтенсивності внутрішнього відбиття $R(\theta)$ для плівки золота і визначати положення мінімуму $R(\theta)$, який відповідає збудженню поверхневих плазмонів на межі плівка Au – оточуюче середовище. Положення мінімуму $R(\theta)$ дуже чутливе до зміни показника заломлення n середовища біля поверхні плівки Au, що і дозволяє реєструвати процеси, які приводять навіть до дуже малих змін n в цій області. Для визначення сенсорної чутливості структур, тобто впливу показника заломлення оточуючого середовища на зсув резонансного мінімуму, в даній роботі використовувались розчини гліцерину (показник заломлення $n = 1,474$ при 20 °C) у воді ($n = 1,333$ при 20 °C). Вагові концентрації розчинів змінювались в інтервалі 34–64% гліцерину, при цьому показник заломлення розчину змінювався від 1,37 до 1,42. Розчин вводився в протічну двоканальну кювету, котра була розташована над досліджуваним зразком таким чином, що забезпечувала контакт рідини зі структурою, при цьому один канал відповідав контрольній плівці золота, а другий – наноструктурованій плівці (з поверхневим рельєфом у вигляді ґратки).

Просторова частота ґратки вибиралась із умови близькості до бреггівського відбивання. Теоретичне моделювання в роботі [13] виконано для ґраток синусоїдального профілю з малою глибиною рельєфу. Для таких ґраток можна приблизно оцінити значення бреггівського періоду ґратки (Λ_B) за допомогою простої формули:

$$\Lambda_B = 0,5\lambda_0[(\varepsilon_{mr} + \varepsilon_D)/\varepsilon_{mr}\varepsilon_D]^{1/2},$$

де λ_0 – довжина світлової хвилі у вакуумі, ε_D – діелектрична константа середовища і ε_{mr} – дій-

сна частина діелектричної сталої металу. Для межі Au – вода при довжині хвилі збудження 850 нм умова бреггівського резонансу відповідає періоду ґратки близько 310 нм (просторова частота $\nu = 3226$ лін./мм). При збільшенні показника заломлення середовища, яке контактує із золотом, умова резонансу задовольняється при менших значеннях періоду ґратки. Так, для гліцерину бреггівський резонанс відповідає періоду 277 нм ($\nu = 3610$ лін./мм). Виходячи з цих оцінок, методом ІЛ були виготовлені зразки з просторовою частотою періодичного нанорельєфу $\nu = (3370 \pm 5)$ лін./мм (період $296,7 \pm 0,5$ нм).

При формуванні халькогенідної літографічної маски в технології ІЛ велику роль відіграє 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. В технології ІЛ застосовується режим невеликого переекспонування фоторезисту, щоб забезпечити циклоїдну форму профілю штрихів періодичної халькогенідної маски. Змінюючи час селективного травлення фоторезисту можливо змінювати ширину елементів літографічної маски і, відповідно, ширину відкритих інтервалів між елементами маски, через які відбувається подальше травлення шару золота.

На рис. 1, *a* показано АСМ-зображення ґратки з періодом $296,7 \pm 0,5$ нм, сформованої на шарі золота товщиною 50 нм за допомогою ІЛ з використанням $As_{40}S_{60}$ фоторезиста. На цьому зразку періодична фоторезистивна маска була сформована з відношенням ширини штриха до ширини проміжку між штрихами (шпаруватість періодичної структури) близьким до одиниці. Час травлення золота через халькогенідну маску – 40 с. Дослідження гістограми висоти штрихів дозволило визначити середню глибину рельєфу ґратки, яка становила $18,5 \pm 2$ нм.

На рис. 1, *b* показано АСМ-зображення ґратки з аналогічними параметрами (період, умови формування фоторезистивної маски), для якої час травлення золота через аналогічну маску становив 25 с. При цьому середня глибина рельєфу ґратки суттєво менша і дорівнює $11,7 \pm 2$ нм.

Формування періодичної ґратки на поверхні золоті плівки викликає зміну форми кутової зале-

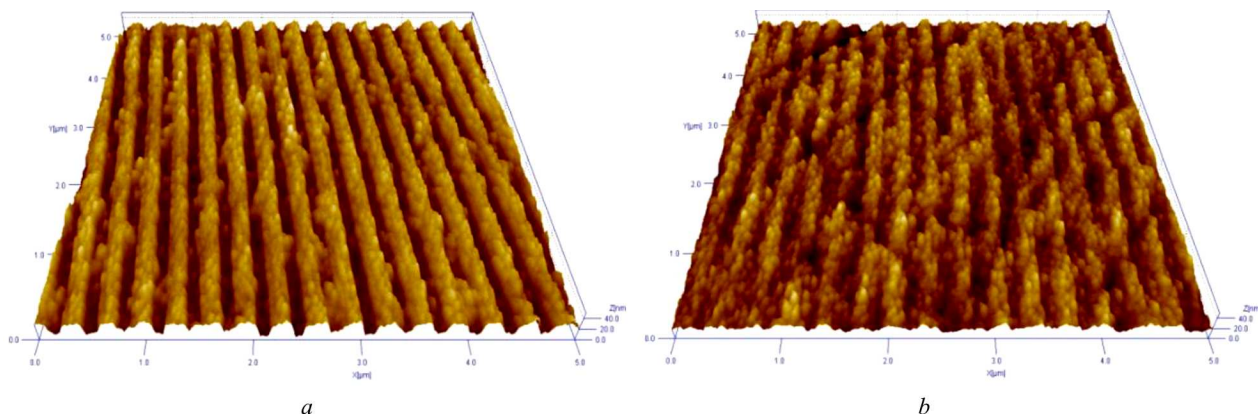


Рис. 1. АСМ-зображення Au ґратки з періодом $296,7 \pm 0,5$ нм та середньою глибиною рельєфу $18,5 \pm 2$ нм (а), та $11,7 \pm 2$ нм (б). Товщина вихідного шару золота – 50 нм

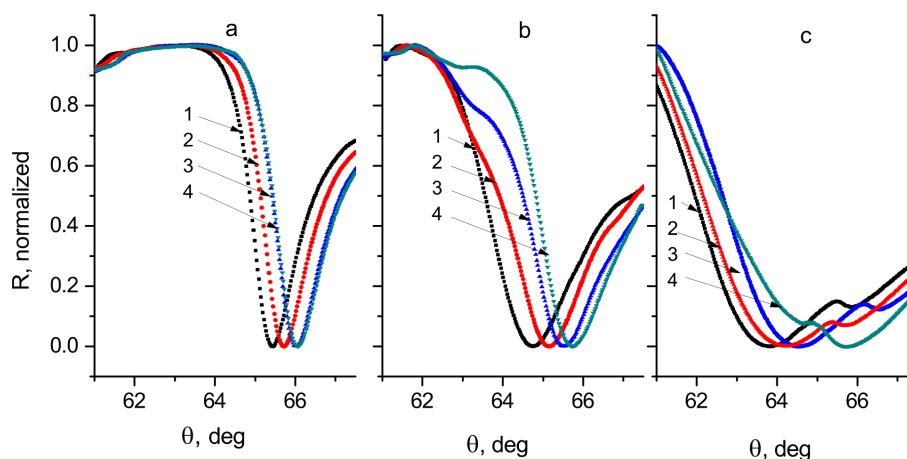


Рис. 2. Залежності відбиття R від кута падіння θ для стандартного Au чіпа з плоскою поверхнею (а) та Au ґраток, які зображені на рис. 1 – з середньою глибиною рельєфу $11,7 \pm 2$ нм (б), та $18,5 \pm 2$ нм (с)

жності відбиття від робочої поверхні сенсорного чіпа біля резонансу порівняно з такою ж залежністю для неструктурованої стандартної плівки Au. На рис. 2, а показано ППР криві (залежності відбиття R від кута падіння θ) для стандартного Au чіпа з плоскою поверхнею, яка контактує з середовищем (розчином гліцерину у воді) з різними значеннями показника заломлення. Крива 1 відповідає $n = 1,3925$, 2 – $n = 1,3952$, 3 – $n = 1,3984$, 4 – $n = 1,4023$. Видно, що зі збільшенням показника заломлення середовища положення мінімуму плазмонного резонансу θ_{\min} зміщується в напрямку більших кутів і при зростанні n на $\approx 0,01$ θ_{\min} збільшується на 1° . Відношення величини зсуву положе-

ння мінімуму $\Delta\theta_{\min}$ до відповідної зміни показника заломлення Δn і характеризує чутливість методу до змін n середовища біля поверхні металеві плівки.

На рис. 2, б показані аналогічні залежності для чіпа із структурованою поверхнею, причому параметри поверхневого рельєфу відповідають рис. 1, б (ґратка з меншою глибиною штрихів). Чіп орієнтовано таким чином, що площина падіння зондуючого променя перпендикулярна штрихам ґратки. Видно, що резонансна крива дещо розширена, а зсув положення мінімуму $\Delta\theta_{\min}$ в тому самому інтервалі зміни показника заломлення середовища дещо більший – $\Delta\theta_{\min} = 1,4^\circ$, що свідчить про відповідне підвищення чутливості структурованого чі-

па порівняно із стандартним у даному інтервалі зміни показника заломлення середовища.

На рис. 2, с наведені ППР криві для ґратки з більшою глибиною рельєфу (зображеної на рис. 1, а) в тому самому інтервалі зміни показника заломлення середовища. У цьому випадку резонансні криві ще більш розширені і спостерігаються два мінімуми. Це узгоджується з результатами теоретичного моделювання в роботі [13], де показано, що для періодичного рельєфу глибиною 20–40 нм в околі бреггівського резонансу ППР крива має двомодову структуру з двома мінімумами. Зсув положення абсолютного мінімуму кривої ППР в даному випадку ще більший, $\Delta\theta_{\min} = 1,86^\circ$.

Більш детально залежності положення ППР резонансу θ_{\min} від показника заломлення середовища наведені на рис. 3 та 4. На рис. 3 (крива 1) показана залежність θ_{\min} від n для стандартного Au чіпа з неструктурованою поверхнею. Видно, що із зростанням n величина θ_{\min} теж монотонно збільшується і нахил цієї залежності (відношення $\Delta\theta_{\min}$ до Δn) майже постійний на всьому досліджуваному інтервалі зміни n середовища. Крива 2 на цьому рисунку відповідає чіпу із структурованою поверхнею у вигляді ґратки з невеликим рельєфом (відповідно рис. 1, b). Для структурованого чіпа залежність θ_{\min} від n нелінійна: при наближенні до умови бреггівського резонансу нахил цієї залежності суттєво зменшується порівняно з результатом для стандартного чіпа, потім спостерігається ділянка підвищеної крутизни (і, відповідно, чутливості) в інтервалі зміни показника заломлення від 1,392 до 1,4 ($\Delta n = 0,008$, на рис. 3 цей інтервал виділено двома вертикальними пунктирами), а за подальшого зростання n середовища стандартний і структурований чіпи мають однакову чутливість. На рис. 3 в інтервалі підвищеної чутливості експериментальні точки як для стандартного, так і структурованого чіпів апроксимовані відрізками прямих ліній. Відношення нахилів цих відрізків, тобто відношення чутливостей структурованого та стандартного чіпів становить 1,4.

На рис. 4 показані залежності θ_{\min} від n теж для стандартного Au чіпа (крива 1) та структурованого зразка з більшою глибиною рельєфу ґратки (відповідає зображенню на рис. 1, а) – крива 2. В результаті збільшення глибини рельєфу ґратки суттєво підвищується нелінійність залежності

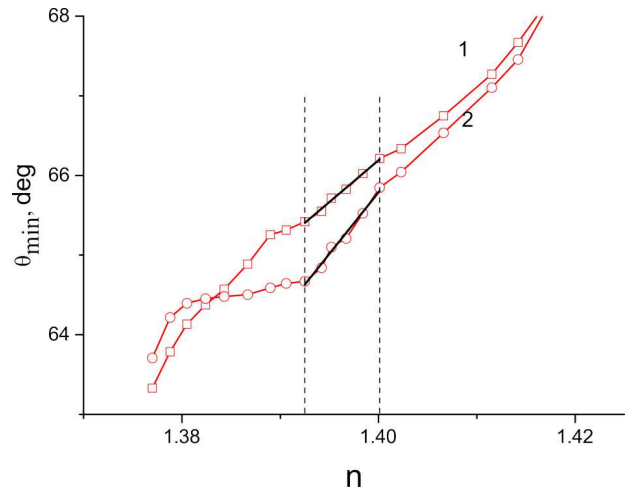


Рис. 3. Залежності положення ППР резонансу θ_{\min} від показника заломлення середовища n для стандартного Au чіпа з плоскою поверхнею (1) та Au ґратки з глибиною рельєфу $11,7 \pm 2$ нм (2)

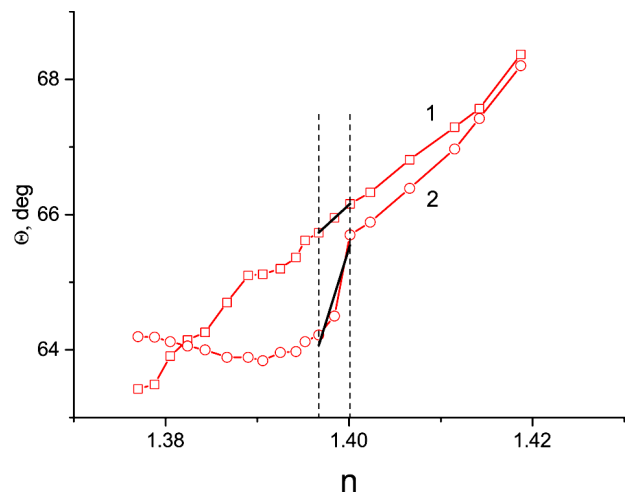


Рис. 4. Залежності θ_{\min} від n для стандартного Au чіпа з плоскою поверхнею (1) та Au ґратки з середньою глибиною рельєфу $18,5 \pm 2$ нм (2)

θ_{\min} від n , спостерігається навіть область від'ємного нахилу (в інтервалі n від 1,38 до 1,39, де θ_{\min} зменшується при зростанні n). Область підвищеної крутизни (чутливості), яка виділена на рисунку вертикальними пунктирними лініями, значно звужується ($\Delta n = 0,0034$), порівняно з чіпом з меншою глибиною рельєфу ґратки, але величина крутизни суттєво зростає. Відношення нахилів відрізків, які апроксимують експериментальні точки для стандартного і структурованого чіпів в області

підвищеної чутливості, для цього зразка становить 3,3. При цьому числові значення чутливості зростають від 110 град./RIU для стандартного чіпа, до 154 град./RIU для структурованого чіпа з меншою глибиною рельєфу та до 363 град./RIU для чіпа з більшою глибиною рельєфу ґратки (де RIU – refractive index unit – одиниця показника заломлення). Слід відзначити, що згідно з теоретичним моделюванням [13] максимальне значення кратності підвищення чутливості таких сенсорів внаслідок формування ґратки з частотою, близькою до умов бреггівського резонансу, становить 6–6,5.

Таким чином, підвищення чутливості сенсорних чіпів внаслідок наноструктурування їх поверхні може спостерігатись в обмеженому інтервалі змін показника заломлення середовища. Це також узгоджується теоретичними результатами [13], де передбачено підсилення в інтервалі Δn менше 0,01. Змінюючи просторову частоту рельєфу ґратки на поверхні чіпа можна вибирати робочий інтервал сенсора з підвищеною чутливістю, який відповідає показнику заломлення досліджуваного середовища. Біохімічні процеси, які досліджуються за допомогою ППР рефрактометрів, часто супроводжуються осадженням моношарів біомолекул і дуже малими змінами значень показника заломлення. Тому підвищення чутливості цих сенсорів навіть в невеликих інтервалах зміни n є актуальним завданням, оскільки навіть інтервал $\Delta n = 0,01$ на 2-3 порядки перевищує межу чутливості ППР рефрактометрів. Зокрема, експериментальна похибка для визначення кутового положення мінімуму ППР для рефрактометра ПЛАЗМОН-71 становить близько 0,0005 градусів, що при чутливості 100 град./RIU відповідає зміні показника заломлення на $5 \cdot 10^{-6}$.

4. Висновки

Показано, що технологія ІЛ з використанням вакуумних халькогенідних фоторезистів дозволяє виготовляти структуровані чіпи для ППР рефрактометрів з необхідними характеристиками (просторовою частотою, глибиною рельєфу, формою профілю елементів).

Результати вимірювання чутливості сенсора в рідкому середовищі підтверджують передбачення теорії про підвищення чутливості ППР біосенсорів шляхом формування ґратки відповідного періоду і глибини рельєфу на робочій поверхні чіпа. Вста-

новлено, що кратність підвищення чутливості та величина інтервалу зміни показника заломлення, в якому спостерігається це підвищення, залежить від глибини рельєфу ґратки. При збільшенні глибини рельєфу ширина робочого інтервалу n середовища зменшується, а кратність підвищення чутливості збільшується.

Роботу виконано при сприянні програми SCOPES Швейцарського національного фонду наукових досліджень (грант IZ73Z0_152661).

1. C. Nylander, B. Liedberg, T. Lind. Gas detection by means of surface plasmon resonance. *Sens. Actuat.* **3**, 79 (1982).
2. B. Moslehi, M.W. Foster, P. Harvey. Optical magnetic and electric field sensors based on surface plasmon polariton resonant coupling. *Electron. Lett.* **27**, 951 (1991).
3. A. Schilling, O. Yavaş, J. Bischof, J. Boneberg, P. Leiderer. Absolute pressure measurements on a nanosecond time scale using surface plasmons. *Appl. Phys. Lett.* **69**, 4159 (1996).
4. H.-M. Schmitt, A. Brecht, J. Piehler, G. Gauglitz. An integrated system for optical biomolecular interaction analysis. *Biosens. Bioelectron.* **12**, 809 (1997).
5. L. Huang, G. Reekmans, D. Saerens, J.-M. Friedt, F. Frederix, L. Francis, S. Muyldermans, A. Campitelli, C. Van Hoof. Prostate-specific antigen immunosensing based on mixed self-assembled monolayers, camel antibodies and colloidal gold enhanced sandwich assays. *Biosens. Bioelectron.* **21**, 483 (2005).
6. E. Mauriz, A. Calle, J.J. Manclús, A. Montoya, L.M. Lechuga. Multi-analyte SPR immunoassay for environmental biosensing of pesticides. *Analyt. Bioanalyt. Chem.* **387**, 1449 (2007).
7. P.D. Patel. Overview of affinity biosensors in food analysis. *J. AOAC Int.* **89**, 805 (2006).
8. E. Kretschmann, H. Raether. Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light. *Z. Naturforsch.* **23A**, 2135 (1968).
9. P. Englebienne, A. Van Hoonacker, M. Verhas. Surface plasmon resonance: principles, methods and applications in biomedical sciences. *Spectroscopy* **17**, 255 (2003).
10. R.S. Moirangthem, Y.-C. Chang, P.-K. Wei. Ellipsometry study on gold-nanoparticle-coated gold thin film for biosensing application. *Biomed. Opt. Express* **2**, 2569 (2011).
11. K.M. Byun, S.J. Yoon, D. Kim, S.J. Kim. Experimental study of sensitivity enhancement in surface plasmon resonance biosensors by use of periodic metallic nanowires. *Opt. Lett.* **32**, 1902 (2007).
12. W.P. Hu, S.-J. Chen, K.-T. Huang, J.H. Hsu, W.Y. Chen, G.L. Chang, K.-A. Lai. A novel ultrahigh-resolution surface plasmon resonance biosensor with an Au nanocluster-embedded dielectric film. *Biosens. Bioelectron.* **19**, 1465 (2004).

13. C.J. Alleyne, A.G. Kirk, R.C. McPhedran, N-A.P. Nicorovici, D. Maystre. Enhanced SPR sensitivity using periodic metallic structures. *Opt. Express* **15**, 8163 (2007).
14. A. Cattoni, E. Cambril, D. Decanini, G. Faini, A.M. Haghiri-Gosnet. Soft UV-NIL at 20 nm scale using flexible bi-layers tamped on HSQ master mold. *Microelectr. Eng.* **87**, 1015 (2010).
15. Y. Fu, N. Kok, A. Bryan, W. Zhou. Self-organized formation of a Blazed-grating-like structure on Si(100) induced by focused ion-beam scanning. *Opt. Express* **12**, 1803 (2004).
16. X.Y. Zhang, A.V. Whitney, J. Zhao, E.M. Hicks, R.P. Van Duyne. Advances in contemporary nanosphere lithographic techniques. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **6**, 1920 (2006).
17. S.Y. Chuang, H.L. Chen, S.S. Kuo, Y.H. Lai, C.C. Lee. Using direct nanoimprinting to study extraordinary transmission in textured metal films. *Opt. Express* **16**, 2415 (2008).
18. F. Brizuela, Y. Wang, C.A. Brewer, F. Pedaci, W. Chao, E.H. Anderson, Y. Liu, K.A. Goldberg, P. Naulleau, P. Wachulak, M.C. Marconi, D.T. Attwood, J.J. Rocca, C.S. Menoni. Microscopy of extreme ultraviolet lithography masks with 13.2 nm tabletop laser illumination. *Opt. Lett.* **34**, 271 (2009).
19. A. Arriola, A. Rodriguez, N. Perez, T. Tavera, M.J. Withford, A. Fuerbach, S.M. Olaizola. Fabrication of high quality sub-micron Au gratings over large areas with pulsed laser interference lithography for SPR sensors. *Opt. Mater. Express* **2**, 1571 (2012).
20. M. Vala, J. Homola. Flexible method based on four-beam interference lithography for fabrication of large areas of perfectly periodic plasmonic arrays. *Opt. Express* **22**, 18778 (2014).
21. І.З. Індутний, В.І. Минько, П.Є. Шепелявий, М.В. Сопінський, В.М. Ткач, В.А. Данько. Формування фотонних наноструктур за допомогою інтерференційної літографії та осадження у вакуумі під ковзним кутом. *Оптоелектроника полупроводниковая техника* **46**, 49 (2011).
22. V. Dan'ko, I. Indutnyi, M. Min'ko, P. Shepelyavyi. Instrumentation and Data Processing. Interference photolithography with the use of resists on the basis of chalcogenide glassy semiconductors. *Optoelectron. Instrument. Proc.* **46**, 483 (2010).
23. V.A. Dan'ko, G.V. Dorozinsky, I.Z. Indutnyi, V.I. Myn'ko, Yu.V. Ushenin, P.E. Shepeliavyi, M.V. Lukaniuk, A.A. Korchovyi, R.V. Khrystosenko. Nanopatterning Au chips for SPR refractometer by using interference lithography and chalcogenide photoresist. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* **18**, 438 (2015).

Одержано 03.05.16

*I.Z. Indutnyi, Yu.V. Ushenin,
V.I. Myn'ko, P.E. Shepeliavyi, M.V. Lukaniuk,
A.A. Korchovyi, R.V. Khrystosenko*

NANOSTRUCTURED Au CHIPS
WITH ENHANCED SENSITIVITY FOR SENSORS
BASED ON SURFACE PLASMON RESONANCE

S u m m a r y

The enhancement of the sensitivity of a surface-plasmon-resonance refractometer by forming a periodic relief in the form of a grating with a submicron period on the surface of an Au chip has been studied. Periodic reliefs with the spatial frequency $\nu = (3370 \pm 5)$ line/mm and various depths were formed on the Au film surface using interference lithography and vacuum chalcogenide photoresists. The degree of refractometer sensitivity enhancement and the variation interval of the environment refractive index, Δn , in which this enhancement is observed, are found to depend on the grating relief depth. The interval Δn decreases with the growth of the relief depth, whereas the sensitivity increases from 110 deg/RIU for a standard chip to 154 and 363 deg/RIU for structured chips with relief depths of 11.7 ± 2 and 18.5 ± 2 nm, respectively.