

УДК 53.082.539

Г. В. ДОРОЖИНСЬКИЙ

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ОСНОВНИХ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ПРИЛАДУ НА ОСНОВІ ЯВИЩА ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ

Розглядається залежність чутливості приладу на основі поверхневого плазмонного резонансу від шорсткості поверхні металевого шару його чутливого елемента та довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів. Встановлено, що зменшення шорсткості поверхні металевого шару та збільшення довжини хвилі викликає підвищення чутливості при вимірюванні зміни інтенсивності відбитого світла та зменшення чутливості при вимірюванні зсуву мінімуму характеристики відбиття. Результати досліджень можуть бути використані для вдосконалення існуючих та створення нових приладів на основі поверхневого плазмонного резонансу.

**Ключові слова:** поверхневий плазмонний резонанс, чутливість, шорсткість поверхні, довжина хвилі випромінювання.

**Вступ.** Одним з перспективних оптичних методів вимірювання для аналізу різноманітних сполук і мікрооб'єктів та процесів на молекулярному рівні є рефрактометричний метод на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР). Вагомими перевагами методу на явищі ППР у порівнянні з традиційними методами вимірювання є можливість вивчення хімічних процесів та молекулярної взаємодії в мікронних шарах у реальному масштабі часу; малий об'єм проби досліджуваної речовини (менше 10 мкл); метод не потребує використання маркерів та флуоресцентних міток для досліджуваної речовини (аналіту) [1].

Провідні тенденції розвитку аналітичних приладів потребують впровадження нових фізичних методів вимірювання, котрі ґрунтуються на останніх досягненнях в області науки та техніки. Основними вимогами до них є підвищення точності і чутливості вимірювання, зменшення часу вимірювання, зменшення об'ємів проб досліджуваних речовин.

Отже, перспективним напрямом вдосконалення аналітичних приладів на основі явища ППР є підвищення їх чутливості шляхом впровадження нових конструкторських рішень та технологічних процесів при їх виготовленні, для чого необхідно провести чисельний аналіз впливу на неї основних конструкторсько-технологічних чинників.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Основне завдання ППР-приладів – визначення мінімальних змін показника заломлення аналіту. Тому для виконання цього завдання необхідно зменшувати межу детектування. Величина межі детектування визначає найменшу зміну ПЗ аналіту при умові, що кутовий зсув мінімуму характеристики відбиття  $R(\theta)$  при цьому перевищує рівень власних шумів ППР-приладу. При цьому збільшення чутливості призводить до зменшення межі детектування, що дає корисний ефект, так як робить можливим вимірювати менші концентрації аналіту.

Чутливість ППР-приладів визначається шириною і формою характеристики відбиття  $R(\theta)$ . Тому напрямом значного підвищення чутливості полягає в застосуванні способів звуження характеристики відбиття, а саме розміщенням в приповерхневій області ЧЕ дифракційних і голографічних структур, застосування біметалічних шарів на поверхні ЧЕ [2, 3]. Звуження резонансного спектру також можливе шляхом збільшення довжини хвилі лазерного випромінювання, котре збуджує поверхневий плазмон, та зменшення шорсткості поверхні металевого шару ЧЕ [4, 5].

Переважна більшість ППР-приладів побудована за геометрією Кречмана [6] (рис. 1, а), яка складається з джерела збудження поверхневих плазмонів 1, призми повного внутрішнього відбиття (ПВВ) 2, чутливого елемента 3 та фотоприймача інтенсивності відбитого від чутливого елемента світла 4. Найбільш поширеним джерелом збудження поверхневих плазмонів є лазери. Принцип роботи ППР-приладів полягає у визначенні зміни показника заломлення (ПЗ) аналіту шляхом вимірювання зсуву мінімуму характеристики відбиття  $R(\theta)$ . Характеристика відбиття – це залежність коефіцієнту відбиття  $R$  (інтенсивності відбитого світла лазера  $I_B$ ) від кута падіння цього світла  $\theta$  на поверхню чутливого елемента в діапазоні кутів, більших за кут ПВВ на межі поділу середовищ чутливий елемент - аналіт (рис. 1, б).

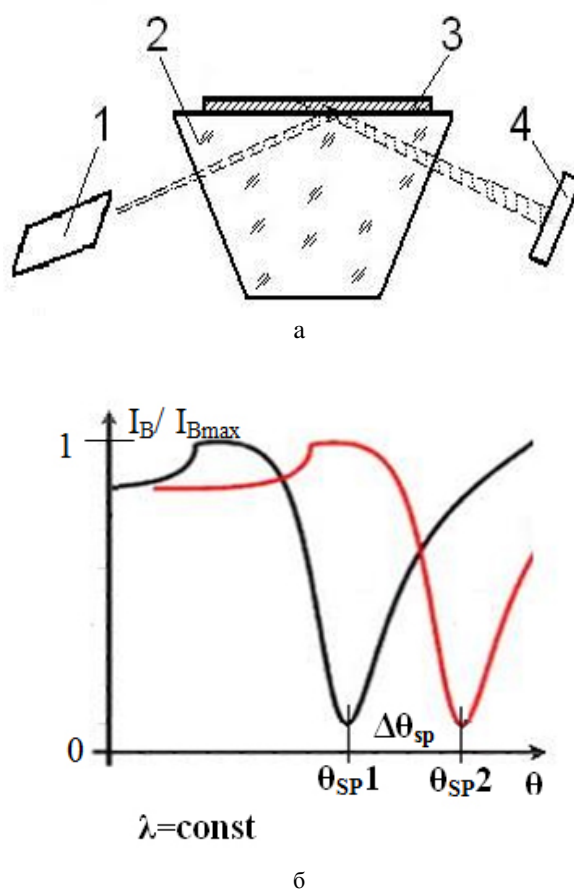


Рис. 1 – Будова ППР-приладу: а – оптична схема з геометрією Кречмана; б – залежність інтенсивності відбитого світла від кута падіння на ЧЕ

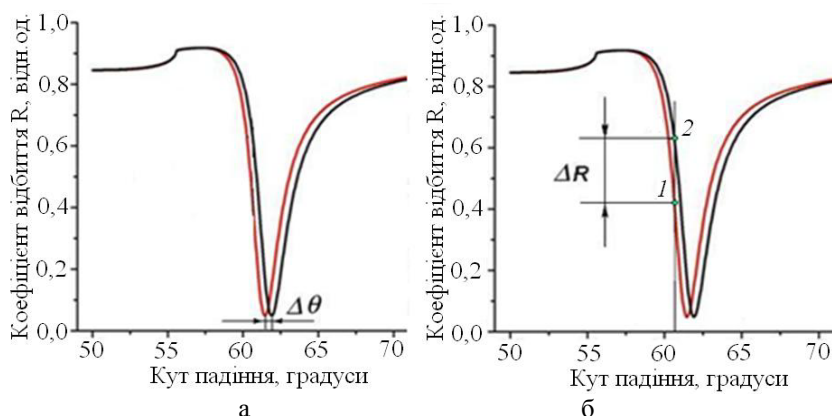


Рис. 2 – Способи вимірювання ППР-приладом: а – зсуву мінімуму  $\Delta\theta$  характеристики  $R(\theta)$  (режим Multiple), б – зміни інтенсивності  $\Delta R$  (режим Slope)

Значення ПЗ аналізу пов'язане зі значенням мінімуму характеристики відбиття  $R(\theta)$   $\theta_{sp}$  через параметри елементів оптичної схеми ППР-приладу, а саме довжина хвилі лазера та показників заломлення чутливого елемента, призми ПВВ та аналізу. Зміна показника заломлення аналізу внаслідок хімічної чи біологічної реакції викликає зсув мінімуму характеристики відбиття  $R(\theta)$   $\Delta\theta_{sp}$ . В ППР-приладах побудованих на геометрії Кречмана існують два режими вимірювання: Multiple і Slope. В режимі Multiple виконується періодичне вимірювання кутового положення мінімуму характеристика відбиття  $R(\theta)$ , а в режимі Slope – періодичне вимірювання інтенсивності відбитого світла при постійному куті його падіння (рис. 2). В режимі Slope виражається у вольтах і чутливість, відповідно, у  $V/град$ .

Зміна показника заломлення аналізу викликає зсув характеристика відбиття  $R(\theta)$  з початкового положення (червона крива) у положення кінцеве (чорна крива). В режимі Multiple для визначення цього зсуву виконується періодичне кутове сканування та одночасне вимірювання інтенсивності відбитого від ЧЕ світла та вимірюється величина кутового зсуву  $\Delta\theta_{min}$ . В режимі Slope спочатку вимірюється вся крива ППР, а потім вимірюється зміна інтенсивності відбитого світла  $\Delta I_B$  (коефіцієнта відбиття  $\Delta R$ ) при постійному куті падіння  $\theta_s$ . За величиною зміни  $\Delta\theta_{min}$  чи  $\Delta R$  розраховується зміна показника заломлення аналізу  $\Delta n_a$ .

Аналіз публікацій показав, що основними чинниками, котрі впливають на величину чутливості ППР-приладу, є рельєф поверхні металевому шару ЧЕ та довжина хвилі випромінювання. Поверхнева шорсткість металу суттєво впливає на розповсюдження поверхневих плазмонів та призводить, внаслідок розсіювання енергії, до передчасного загасання плазмонів та зменшення їх фазової швидкості [5]. Зі зростанням шорсткості поверхні металевому шару ЧЕ мінімум характеристики відбиття  $R(\theta)$  підвищується і характеристика розширюється, що викликає зменшення крутизни її схилів. Для отримання мінімальної шорсткості (близько 10 нм RMS) рекомендується виконувати відпал металевому шару при температурі 120 °C [7]. Авторами не було досліджено залежність чутливості від товщини проміжного шару сформованого шорсткою поверхнею ЧЕ ППР-приладу.

Для ППР-приладів побудованих на геометрії Кречмана чутливість в режимі вимірювання Multiple знаходиться в межах від 66 до 650  $град/RIU$  ( $RIU$  – refractive index unit – позасистемна одиниця вимірювання показника заломлення) для довжини хвилі 670 нм і залежить від конструкції ЧЕ [8 – 10]. Такій чутливості відповідає значення межі детектування відповідно від  $15 \cdot 10^{-7} RIU$  до  $1,5 \cdot 10^{-7} RIU$  при рівні шуму у вихідному сигналі ППР-приладу рівному  $1 \cdot 10^{-4} градуси$ . Не досліджено залежність чутливості в діапазоні довжин хвилі, що є необ-

хідним для удосконалення ППР-приладів шляхом оптимізації довжини хвилі з точки зору досягнення максимальної чутливості та мінімального впливу на аналіз.

**Ціль та задачі дослідження.** Метою дослідження є визначення впливу шорсткості поверхні чутливого елемента та довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів на чутливість ППР-приладу.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Виконати чисельний аналіз впливу шорсткості поверхні ЧЕ на величину чутливості ППР-приладу для режимів роботи Multiple та Slope.

2. Виконати чисельний аналіз впливу довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів в металевому шарі ЧЕ на величину чутливості ППР-приладу для режимів роботи Multiple та Slope.

**Матеріали та методи дослідження основних конструкторсько-технологічних чинників на чутливість приладу на основі явища поверхневого плазмонного резонансу.** Методичною основою виконання комплексних досліджень є: чисельний аналіз залежностей чутливості ППР-приладу серії «Плазмон» в режимі вимірювання Slope від шорсткості поверхні металевому шару чутливого елемента та довжини хвилі збудження поверхневих плазмонів.

Аналіз чутливості виконано для приладу «Плазмон-6» розробленого в Інституті фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, який було обрано для модернізації [11]. Робочу поверхню ЧЕ приладу формує плівка золота товщиною 48...52 нм нанесена на скляну пластинку оптично з'єднану з призмою ПВВ імерсійною рідиною. Джерелом збудження поверхневих плазмонів є р-поляризоване світло від напівпровідникового лазерного діоду з довжиною хвилі випромінювання 650 нм. Необхідні умови для збудження поверхневого плазмону забезпечуються зміною кута падіння на поверхню ЧЕ променя світла від лазера обертанням призми ПВВ.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання показника заломлення аналізу ППР-приладом «Плазмон-6» в режимах Multiple та Slope.

Предметом дослідження є чутливість ППР-приладу «Плазмон-6» в режимах Multiple та Slope при вимірюванні показника заломлення рідких та газоподібних середовищ.

Чутливість ППР-приладів з призмовим збудженням за схемою Кречмана в конфігурації сканування кута з механічною розгорткою (у газподібному і рідкому середовищах) при фіксованій довжині хвилі визначається як відношення між зсувом кута мінімуму кривої ППР (резонансного кута)  $\Delta\theta_{\min}$  та зміною ПЗ аналіту  $\Delta N_a$ , котра викликала цей кутовий зсув [12]. Формула (1) визначає чутливість в режимі вимірювання Multiple. В режимі вимірювання Slope вираз чутливості приймає інший вигляд (2).

$$S_{\theta} = \frac{\Delta\theta_{\min}}{\Delta N_a} \tag{1}$$

$$S_R = \frac{\Delta R}{\Delta N_a} \tag{2}$$

Оцінку впливу основних конструкторсько-технологічних чинників на величину чутливості ППР-приладу було виконано за допомогою чисельного моделювання шляхом побудови теоретичної характеристики відбиття  $R(\theta)$  для багатошарової системи “призма (скло) – металева плівка – проміжний шар – зовнішнє середовище (аналіт)” і *p*-поляризованого монохроматичного падаючого випромінювання. Характеристику відбиття  $R(\theta)$  розраховували як функцію кута падіння, використовуючи формули Френеля і математичний формалізм матриць розсіювання Джонса на основі методики [13]. У якості моделі розглядалась оптична система з 3 плоскопаралельних шарів з оптичними параметрами  $\mathbf{n}, \mathbf{k}, \mathbf{d}$  для довжини хвилі лазера  $\lambda = 650 \text{ нм}$  [14-16]. Перший шар моделював призмуПВВ з ПЗ  $\mathbf{n}_p$ . Другий шар – металевий шар з параметрами  $\mathbf{n}_m, \mathbf{k}_m, \mathbf{d}_m$  у якому збуджуються поверхневі плазмони. Третій шар описує шорсткість поверхні металевого шару ЧЕ і характеризується оптичними параметрами  $\mathbf{n}_e, \mathbf{k}_e, \mathbf{d}_e$ . Було запропоновано моделювати шорсткість поверхні металевого шару ЧЕ у вигляді 1-D моделі, котра представляє собою вершини конусної форми з висотою  $\mathbf{h}_k$  та діаметром  $\mathbf{d}_k$ . Для визначення оптичних параметрів проміжного шару  $\mathbf{n}_e, \mathbf{k}_e$  була застосована модель ефективного середовища Максвелла-Гарнетта [17], а товщина шару визначалась висотою вершини як  $\mathbf{h}_e = \mathbf{h}_k$ . На основі чисельного аналізу було визначено його оптичні параметри, а саме:  $n_e = 0,15647, k_e = 2,26058$ . При чисельному аналізі параметром, котрий змінювався, була товщина шару  $\mathbf{h}_e$ , яка варіювалася в діапазоні від 1 до 20 нм з кроком 1 нм.

**Результати дослідження основних конструкторсько-технологічних чинників на чутливість приладу на основі явища поверхневого плазмонного резонансу.** В результаті проведених досліджень було встановлено, що збільшення шорсткості поверхні ЧЕ веде до розширення характеристики відбиття  $R(\theta)$  та до зменшення крутизни нахилу лівого схилу кривої, що зменшує чутливість в режимі Slope (рис. 3,а). Проміжний шар товщиною 20 нм зменшує чутливість майже вдвічі. Натомість в режимі Multiple збільшення проміжного шару підвищує чутливість (рис. 3,б) за рахунок збільшення добутку  $\mathbf{n}_e \mathbf{d}_e$ , котрий відповідає за величину зсуву мінімуму характеристики відбиття  $R(\theta)$ .

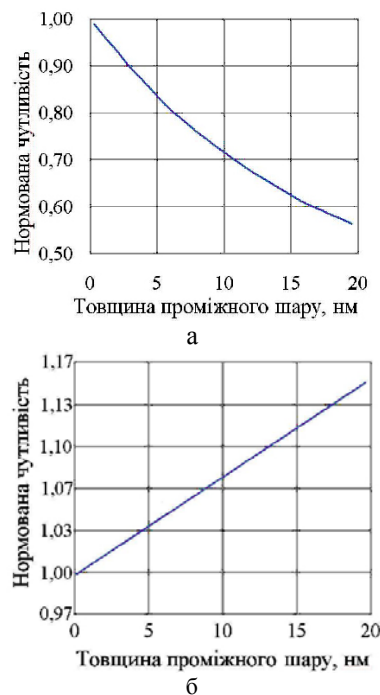


Рис. 3 – Результати чисельного аналізу залежності чутливості ППР-приладу «Плазмон-6» від товщини проміжного шару: а – в режимі Slope, б – в режимі Multiple.

В результаті чисельного розрахунку залежності чутливості від довжини хвилі було встановлено, що збільшення довжини хвилі впливає на чутливість ППР-приладу внаслідок звуження кривої ППР та збільшення крутизни її схилів, що викликає підвищення чутливості  $S_R$  в режимі вимірювання Slope (рис. 4, а). В режимі Multiple спостерігається зниження чутливості  $S_{\theta}$  (рис. 4, б).

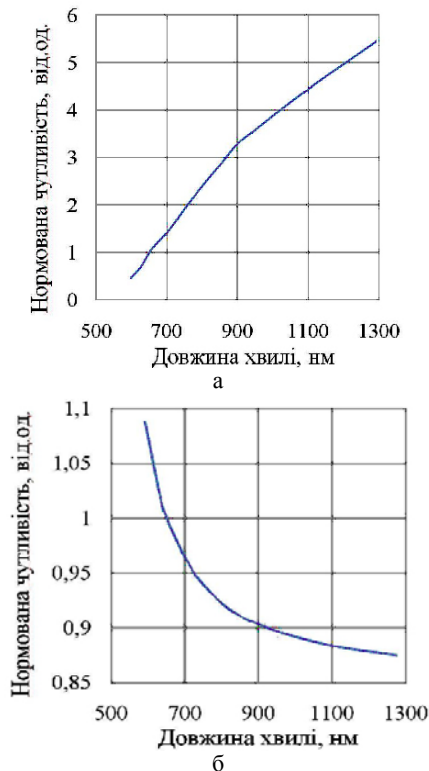


Рис. 4 – Результати чисельного аналізу залежності нормованої чутливості від довжини хвилі збудження: а – в режимі Slope, б – в режимі Multiple

Межі діапазону довжин хвиль були обрані за результатами попередніх розрахунків, котрі визначили, що:

1. При довжинах хвиль, менших за 589 нм, мінімум характеристики відбиття  $R(\theta)$  втрачає екстремум, а форма кривої стає суттєво несиметричною;

2. При довжинах хвиль, більших за 1200 нм, зменшується кількість вимірних значень при кутовому скануванні та коефіцієнт відбиття в мінімумі характеристики відбиття  $R(\theta)$  стає більшим 0,2, що зменшує динамічний кутовий діапазон вимірювання в режимі Slope.

**Обговорення результатів дослідження основних конструкторсько-технологічних чинників на чутливість приладу на основі явища поверхневого плазмонного резонансу.** За результатами чисельного моделювання встановлено, що збільшення шорсткості поверхні металевого шару ЧЕ підвищує чутливість ППР-приладу на 16 % в режимі вимірювання Multiple з 65 град/RIU до 75 град/RIU за рахунок збільшення товщини проміжного шару між металевим шаром ЧЕ та аналітом. При цьому чутливість в режимі Slope зменшується з 5,13 В/град до 2,82 В/град при зростанні шорсткості поверхні ЧЕ від 0 до 20 нм, що пояснюється зменшенням крутизни лівого схилу характеристики відбиття  $R(\theta)$  внаслідок її розширення. Причому чутливість ППР-приладу спадає на 2,2% на кожний додатковий нанометр висоти мікрошорсткості.

Тому для підвищення чутливості приладу в режимі вимірювання Slope треба зменшувати шорсткість поверхні металевого шару ЧЕ запроваджуючи нові технології нанесення металевого або додаткового поруватого шару ЧЕ на підкладку.

Збільшення довжини хвилі від 650 до 1200 нм підвищує чутливість приладу в 5 разів в режимі Slope: з 5,13 В/град до 26 В/град та зменшує чутливість приладу на 13 % в режимі Multiple: з 65 град/RIU до 56 град/RIU, тому подальшим етапом експериментальних досліджень необхідно оптимізувати довжину хвилі лазерного діода з врахування наявних напівпровідникових лазерів, що серійно виробляються.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень та чисельного аналізу встановлено:

1. З 5,13 В/град до 2,82 В/град (в 2 рази) зменшується чутливість ППР-приладу «Плазмон-6» в режимі вимірювання Slope при зростанні шорсткості поверхні ЧЕ від 0 до 20 нм, що пояснюється зменшенням крутизни лівого схилу характеристики відбиття  $R(\theta)$  внаслідок її розширення. Причому чутливість ППР-приладу спадає на 2,2 % на кожний додатковий нанометр висоти шорсткості.

2. З 5,13 В/град до 26 В/град (в 5 разів) підвищується чутливість ППР-приладу при збільшенні довжини хвилі випромінювання лазера від 650...1200 нм внаслідок, що пояснюється збільшенням крутизни лівого схилу характеристики відбиття  $R(\theta)$ . В діапазоні довжин хвиль менших за 589 нм та до 650 нм мінімум характеристики відбиття  $R(\theta)$  має слабо виражений екстремум, а форма кривої є суттєво несиметричною і чутливість ППР-приладу менша за 5,13 В/град. При довжинах хвиль понад 1200 нм зменшується кількість вимірних значень при кутовому скануванні приладом «Плазмон-6» та коефіцієнт відбиття в мінімумі

характеристики відбиття  $R(\theta)$  зростає до 0,2, що зменшує динамічний кутовий діапазон вимірювання в режимі Slope.

**Список літератури:** 1. *Войтович, И. Д.* Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения [Текст] / И. Д. Войтович, С. Г. Корсунский – К.: Сталь, 2011, – 534 с. 2. *Palagushkin, A. N.* Plasmonic Holographic Nanostructures [Text] / A. N. Palagushkin, S. A. Prokopenko, A. P. Sergeev // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) – 2009. – Vol. 18, No. 3. – P. 156–163. 3. *Shirshov, Yu. M.* Bimetallic layers increase sensitivity of affinity sensors based on surface plasmon resonance [Text] / Yu. M. Shirshov, A. V. Samoylov, S. A. Zinyo, E. R. Surovceva, V. Mirskiy // Sensors. – 2002. – Vol. 2. – P. 62–70. 4. *Ушенін, Ю. В.* Увеличение чувствительности сенсоров изменения показателя преломления среды на основе поверхностного плазмонного резонанса [Текст] / Ю. В. Ушенін, А. В. Самойлов, П. В. Христосенко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. – No1 – С. 12–14. 5. *Braundmeier, A. J.* Effect of surface roughness on surface plasmon resonance adsorption [Text] / A. J. Braundmeier, E. T. Arakawa // Journal Physics Chemistry Solids. – 1974. – 35. – P. 517–520. 6. *Kretschmann, E.* Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberflächen plasmaschwingungen // Z. Phys. – 1971. – Vol. 241. – P. 313–324. 7. *Snopok, B. A.* Optical biosensors based on the surface plasmon resonance phenomenon: optimization of the metal layer parameters [Text] / B. A. Snopok, E. V. Kostyukevich, S. I. Lysenko, P. M. Lytvyn, O. S. Lytvyn, [et al.] // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2001. – Vol. 4, No 1. – P. 56–69. 8. *Homola, J.* Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers: sensitivity comparison [Text] / J. Homola, I. Koudela, S. S. Yee // Sensors and Actuators B. – 1999. – Vol. 54. – P. 16–24. 9. *Gupta, G.* Tuning and sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor [Text] / G. Gupta, J. Kondoh // Sensors and Actuators B. – 2007. – Vol. 122. – P. 381–388. 10. *Shalabney, A.* Electromagnetic field distribution in multilayer thin film structures and the origin of sensitivity enhancement in surface plasmon resonance sensors [Text] / A. Shalabney, I. Abdulhalim // Sensors and Actuators A. – 2010. – Vol. 159. – P. 24–32. 11. *Венгер, С. Ф.* Спектрометр поверхневого плазмонного резонансу Плазмон-6 [Текст] / С. Ф. Венгер, С. А. Зиньо, С. П. Мацас, А. В. Самойлов, Ю. В. Ушенін, та ін. // Тези доповідей науково-практичної конференції СЕНСОР-2007. – (Одеса Україна). – 2007. – С. 111. 12. *Shalabney, A.* Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors [Text] / A. Shalabney, I. Abdulhalim // Laser Photonics Rev. – 2011. – Vol. 5, No.4. – P. 571–606. 13. *Chegel, V. I.* Experimental investigations and computer modelling of the photochemical processes in Ag-As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> structures using surface plasmon resonance spectroscopy [Text] / V. I. Chegel, Yu. M. Shirshov, S. O. Kostyukevich [et al.] // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2001. – Vol. 4, No.4. – P. 301–306. 14. Официальный сайт ООО «ШОТТ Фармасьютикал Пэкэджинг» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www\URL: <http://www.schott.com/> 15. *Rakic, A. D.* Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices [Text] / A. D. Rakic, A. B. Djuricic, J. M. Elazar, M. L. Majewski // Appl. Opt. – 1998. – Vol. 37. – P. 5271–5283. 16. *Kedenburg, S.* Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear liquids in the visible and near-infrared spectral region [Text] / S. Kedenburg, M. Vieweg, T. Gissibl, H. Giessen // Opt. Mat. Express. – 2012. – Vol. 2. – P. 1588–1611. 17. *Azzam, R. M. A.* Ellipsometry and Polarized Light [Text] / R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. – Amsterdam: North-Holland, 1987. – 583 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Vojtovych, I. D., Korsunskyi, S. G.* (2011). Sensory na osnove plazmonnogo rezonansa: principy, tehnologii, pryimeneniya, Kyiv: Stal, p. 534. 2. *Palagushkin, A. N., Prokopenko, S. A., Sergeev, A. P.* (2009). Plasmonic Holographic Nanostructures. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 18 (3), 156–163. 3. *Shirshov, Yu. M., Samoylov, A. V., Zinyo, S. A., Surovceva, E. R., Mirskiy V.* (2002). Bimetallic layers increase sensitivity of affinity sensors based on surface plasmon resonance. *Sensors*, 2, 62–70. 4. *Ushenin, Yu. V., Samoylov, A. V., Khristosenko, R. V.* (2011). Uvelichenie chuvstvitelnosti sensorov izmeneniya pokazatelya prelomleniya sredy na osnove poverkhnostnogo plazmonnogo rezonansa. *Tehnologia i konstruirovaniye v elektronnoy apparatury*, 1, 12–14. 5. *Braundmeier, A. J., Arakawa, E. T.* (1974). Effect of surface roughness on surface plasmon resonance adsorption. *Journal Physics Chemistry Solids*, 35, 517–520. 6. *Kretschmann, E.* (1971). Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberflächen plasma-

schwingungen. *Z. Phys.*, 1 (241), 313–324. 7. Snopok, B. A., Kostyukovich, E. V., Lysenko, S. I., Lytvyn, P. M., Lytvyn, O. S. [et al.] (2001). Optical biosensors based on the surface plasmon resonance phenomenon: optimization of the metal layer parameters. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, 4 (1), 56–69. 8. Homola, J., Koudela, I., Yee S. S. (1999). Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers: sensitivity comparison. *Sensors and Actuators B*, 54, 16–24. 9. Gupta, G., Kondoh, J. (2001). Tuning and sensitivity enhancement of surface plasmon resonance sensor. *Sensors and Actuators B*, 122, 381–388. 10. Shalabney, A., Abdulhalim, I. (2010). Electromagnetic field distribution in multi-layer thin film structures and the origin of sensitivity enhancement in surface plasmon resonance sensors. *Sensors and Actuators A*, 159, 24–32. 11. Venger, Ye. F., Zinyo, S. A., Matsas, Ye. P., Samoylov, A. V., Ushenin, Yu. V. *in*. (2007). Spektrometr poverkhnevoogo plazmonnogo rezonansu Plazmon-6. *Tezyu dopovidej naukovo-praktychnoyi konferenciyi SENSOR*, 111. 12. Shalabney, A., Abdulhalim, I. (2011).

Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors. *Laser Photonics Rev*, 5 (4), 571–606. 13. Chegel, V. I., M. Shirshov, Yu., Kostyukovich, S. O. [et al.] (2001). Experimental investigations and computer modelling of the photochemical processes in Ag-As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> structures using surface plasmon resonance spectroscopy. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 4 (4), 301–306. 14. Oficialnyj sajt OOO «ShOTT Farmasyutikal Pekkedzhing» [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: \www/URL: <http://www.schott.com/>. 15. Rakic, A. D., Djuricic, A.B., Elazar, J. M., Majewski, M. L. (1998). Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Appl. Opt.*, 37, 5271–5283. 16. Kedenburg, S., Vieweg, M., Gissibl, T., Giessen, H. (2012). Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear liquids in the visible and near-infrared spectral region. *Opt. Mat. Express.*, 2, 1588–1611. 17. Azzam, R. M. A., Bashara, N. M. (1987). *Ellipsometry and Polarized Light*, Amsterdam: North-Holland, 583.

Надійшла (received) 04.12.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Дорожинський Гліб Вячеславович** – молодший науковий співробітник відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарєва НАН України; пр. Науки, 41, м. Київ, Україна, 03028; тел.: 098-281-90-10; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

**Дорожинский Глеб Вячеславович** – младший научный сотрудник отдела физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников имени В. Е. Лашкарёва НАН; пр. Науки, 41, г. Киев, Украина, 03028; тел.: 098-281-90-10; e-mail: gvdorozinsky@ukr.net.

**Dorozinsky Glib** – junior researcher of department of physical and technological bases of sensory materials, V. Ye. Lashkaryov Institute of semiconductor physics NAS of Ukraine; 41 pr. Nauky, Kyiv, Ukraine, 03028;

УДК 577.15:644.5.096.4:543.42

**Н. А. ДЗЮБА, О. В. ЗЕМЛЯКОВА**

### ОСОБЛИВОСТІ ІММОБІЛІЗАЦІЇ $\alpha$ -АМІЛАЗИ НА БІЛКОВИХ ТА ПОЛІСАХАРИДНИХ МАТРИЦЯХ

В статті розглядається отримання біологічно активних добавок шляхом іммобілізації  $\alpha$ -амілази на білкових та полісахаридних матрицях. В результаті іммобілізації  $\alpha$ -амілази на матрицях утворюються зв'язки, які можна визначити за допомогою ІЧ-спектроскопії. Розглянуто можливість використання ІЧ-спектроскопії для аналізу зв'язків при іммобілізації  $\alpha$ -амілази на білковій та полісахаридній матрицях. Проведено глибокий аналіз зв'язків в молекулах матриць та іммобілізованого ферменту на матрицях різної природи. Визначено функціональні зв'язки за допомогою яких відбувається іммобілізація  $\alpha$ -амілази на глютині та агарі.

**Ключові слова:** біологічно активні добавки, іммобілізація  $\alpha$ -амілази, глютин, агар, ІЧ-спектроскопія, функціональні продукти.

**Вступ.** Для профілактики прогресування захворювань, які пов'язані з порушенням ферментативної активності, разом з медикаментозною терапією, населенню необхідно вживати функціональні продукти харчування та біологічно активні добавки (БАД), які здатні регулювати рівень глюкози в крові людини. Асортимент функціональних продуктів в значній мірі визначається набором функціональних інгредієнтів або біологічно активних речовин (БАР), для більшості з яких ідентифікована їх основна потенційна користь для здоров'я.

Зважаючи на те, що ферменти мають білкову природу і досить не стабільні при температурі та концентрації іонів водню в середовищі постає актуальне питання стабілізації біокоректорів з метою подальшого їх використання в раціонах харчування та у складі харчових систем. Це обумовлює перспективність подальшого вивчення функціональних властивостей іммобілізованих ферментів та вивчення зв'язків, за рахунок яких проходить зв'язування ферменту з матрицею.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** В останні роки в Україні розробляється і

впроваджується значна кількість спеціальних харчових продуктів, БАД і продуктів лікувально-профілактичного призначення, які є джерелами цінних харчових речовин, що характеризуються здатністю до зв'язування і виведення радіонуклідів, токсинів, солей важких металів з організму [1].

Суттєві недоліки прямого введення БАР в організм людини обмежують їх використання: алергічні реакції, неспецифічна токсичність і пірогенність, чутливість до температури, рН та іонної сили, інактивація під дією ендогенних ферментів та інгібіторів [2]. Успіхи використання іммобілізованих препаратів в народному господарстві та медицині значною мірою визначаються вірністю вибору методу іммобілізації та природи носія, який використовується.

Носії, які використовуються для отримання іммобілізованих препаратів, повинні мати високу гідрофільність, стійкість до хімічних та мікробних уражень, легко активуватися (хімічним або фізичним методом), не впливати на активність БАР та володіти мінімальною неспецифічною адсорбцією. Наявність на носіїв і БАР зарядів з різними знаками значно

© Н. А. Дзюба, О. В. Землякова. 2015