

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ВДОСКОНАЛЕНИМ ППР-СЕНСОРОМ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проведені дослідження впливу електронно-променевої обробки поверхні скляних підкладок сенсорів на основі явища поверхневого плазмонного резонансу з плазмонносійним шаром золота на точність визначення кутового положення мінімуму характеристики відбиття із застосуванням чисельних методів обробки результатів прямих вимірювань, а саме: методів апроксимації поліномами 2-го, 3-го та 4-го ступенів та методу середньої лінії. Досліджено сенсори з різною питомою потужністю електронно-променевої обробки поверхні скляних підкладок: 0, 27 та 36 Вт/мм<sup>2</sup>. Досліджували характеристики відбиття для границі золото-повітря. За результатами експериментів та чисельного аналізу встановлено, що вплив електронно-променевої обробки на зміну абсолютної похибки визначення мінімуму характеристики відбиття суттєво залежить від вибраного чисельного методу. Так вдосконалений метод середньої лінії забезпечує зменшення абсолютної похибки вимірювання порівняно з методом середньої лінії в 6 разів для зразків без обробки та майже в 12 разів — для зразків з обробкою потужністю 27 Вт/мм<sup>2</sup>. Для цього методу найменша абсолютна похибка спостерігається для потужності електронно-променевої обробки 36 Вт/мм<sup>2</sup> і становить 0,58 кут. сек., що свідчить про доцільність застосування нового методу. В порівнянні з методами апроксимації поліномами та методом середньої лінії вдосконалений метод середньої лінії має більшу точність визначення мінімуму характеристики відбиття через те, що менше залежить не тільки від її симетричності, яка пов'язана з оптичними характеристиками перехідного шару золото-повітря, а й від змін величини інтенсивності відбитого світла в мінімумі характеристики відбиття. За результатами розрахунків на основі попередньо визначених оптичних констант за вимірними характеристиками відбиття встановлено, що з підвищенням потужності опромінення збільшується симетричність характеристики відбиття, відстань розповсюдження і глибина проникнення поверхневих плазмонів у повітря, що пов'язано зі зменшенням шорсткості поверхні золота після електронно-променевої обробки, та, як наслідок, зменшення загасання поля поверхневих плазмонів. Дослідження можуть бути корисними для розробки сенсорів на основі явища поверхневого плазмонного резонансу та методів обробки результатів вимірювання.

**Ключові слова:** характеристика відбиття, електронно-променева обробка, поверхневий плазмонний резонанс, кутове положення мінімуму характеристики відбиття.

### Вступ

Для виявлення зміни вмісту аналізованого компонента досліджуваного середовища чи параметра, функціонально зв'язаного з ним, використовують сенсори. В дослідженнях низьких концентрацій аналіту, для виявлення специфічних біомолекулярних взаємодій без застосування маркерів, а також для дослідження перебігу хімічних чи біологічних реакцій на поверхні в реальному часі застосовують малогабаритні сенсори на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР) [1]. Зазвичай вони містять тонкий провідний шар нанометрової товщини, на поверхні якого збуджуються поверхневі плазмони. За умови більшого кута падіння на тонкий провідний шар р-поляризованого світла за кут повного внутрішнього відбиття  $\theta_{\text{ПВВ}}$  зі сторони оптично щільнішого середовища стає можливим спостереження явища ППР. Якщо протилежна сторона провідного шару контактує з досліджуваним оптично менш щільним середовищем (аналітом), то електричне поле

електромагнітної хвилі проникає в аналіт, але лише на відстань, не більшу за довжину хвилі світла. Зміна в аналіті викликає зсув характеристики відбиття  $R(\theta)$ , яка є залежністю інтенсивності

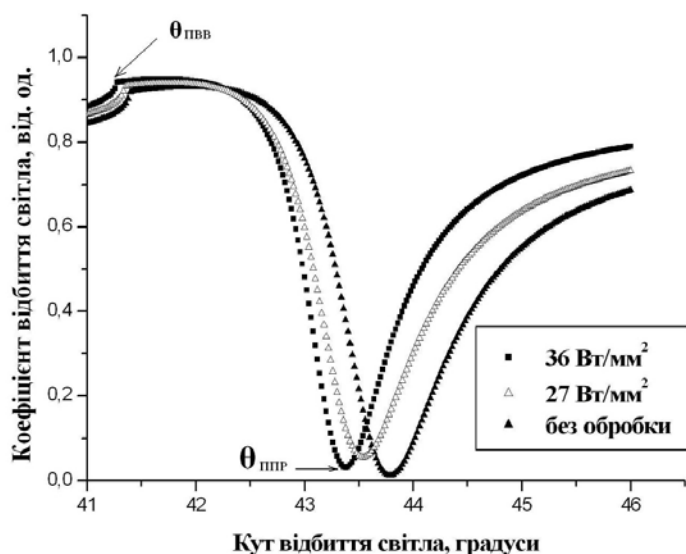


Рис. 1. Характеристики відбиття для трьох зразків

відбитого випромінювання (коефіцієнта відбиття  $R$ ) від кутів падіння цього випромінювання  $\theta$  (рис. 1). За резонансного поглинання енергії випромінювання поверхневими плазмонами реєструється мінімум інтенсивності на характеристиці відбиття з певним кутом  $\theta_{\text{ППР}}$ , який перераховується в показник заломлення  $n$  аналіту, розташованим на поверхні провідного шару. Зміни в аналіті приводять до змін показника заломлення, що дає можливість досліджувати процеси в реальному часі, реєструючи параметри характеристики відбиття.

В якості провідного шару сенсорів на основі ППР (ППР-сенсорів) використовують метали з високою електропровідністю, в основному золото, яке наноситься на скляну підкладку. Поверхнева шорсткість металу суттєво впливає на розповсюдження поверхневих плазмонів та призводить, внаслідок розсіювання енергії, до передчасного загасання плазмонів. Для зменшення абсолютної похибки вимірювання показника заломлення аналіту та підвищення чутливості необхідно зменшити неоднорідність поверхні металевого шару чутливого елемента. Основним фактором, який впливає на структуру та властивості, а також нанощорсткість металевих шарів, виготовлених методом термічного випаровування в вакуумі, є вплив нанорельєфу скляної підкладки. В оптичній промисловості використовуються традиційні методи полірування, які не дозволяють уникнути поверхневих дефектів на оптичних поверхнях. Перспективним для отримання якісно відполірованої поверхні є метод електронно-променевої обробки поверхні. Дослідження виробів після електронно-променевої обробки забезпечують середньоквадратичну нанощорсткість поверхні, яка становить 2...5 нм. Тому метод електронно-променевої обробки поверхні скляних підкладок для сенсорів на основі ППР є перспективним з огляду зменшення нанощорсткості скляної поверхні та покращення рефрактометричних характеристик [2].

Визначення кутового положення мінімуму  $\theta_{\text{ППР}}$  для резонансної характеристики відбиття відбувається шляхом її математичної обробки. Точне визначення мінімуму характеристики відбиття за умов спостереження явища ППР є досить важливим питанням для визначення показника заломлення, концентрації та товщини досліджуваного середовища. Найпоширенішим методом для визначення реального мінімуму характеристики відбиття при ППР є поліноміальний метод [3], [4], який залежить від форми характеристики відбиття. Оскільки характеристика відбиття при ППР несиметрична, будь-які зміни в діапазоні даних призводять до помилкового зсуву обчисленого мінімуму. Авторами [5] запропоновано альтернативний метод — метод середньої лінії, який забезпечив менше значення абсолютної похибки у порівнянні з поліноміальними методами апроксимації. Суть методу полягає у визначенні резонансного кута як точки перетину осі кутів падіння та лінії, що проходить через середини відрізків, котрі сполучають еквірівневі точки по осі інтенсивності відбитого світла, що розташовані на схилах резонансної характеристики відбиття. Крім мінімуму характеристики відбиття є й інші параметри з важливою інформацією: критичний кут, асиметрія, нахил, інтенсивність.

Незважаючи на досягнення значної чутливості сенсорів на основі ППР [6], існує проблема забезпечення точності результату їх вимірювання як наслідок дії багатьох чинників, які супроводжують процес вимірювання. Оскільки, нанощорсткість підкладки впливає на формування металевієї плівки сенсорів на основі ППР, в якій збуджуються поверхневі плаزمони, необхідно дослідити вплив електронно-променевої обробки на оптичні характеристики металевієї плівки та точність вимірювання мінімуму характеристики відбиття вдосконалених сенсорів чисельними методами.

## Методика досліджень та результати

Для експериментальних досліджень використано прилад на основі явища ППР «Плазмон-6» (виробник — Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України). У цьому приладі застосовано призмий метод збудження поверхневих плазмонів з використанням геометрії Кречмана, оптична схема якої складається з джерела випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 650$  нм, призми, чутливого елемента з наночастиною провідного матеріалу і фотоприймачем [7].

Досліджено три чутливі елементи ППР-сенсорів: з різною питомою потужністю електронно-променевої обробки скляної підкладки  $27 \text{ Вт/мм}^2$  і  $36 \text{ Вт/мм}^2$  та без електронно-променевої обробки. Використано скляні прямокутні зразки розмірами  $1 \times 20 \times 20$  мм (В $\times$ Ш $\times$ Д) з відхиленням  $\pm 0,1$  мм, марка скла: крон К8 (показник заломлення  $n_D = 1,5141 \pm 0,0001$ ). Скляні зразки проходили обробку механічним поліруванням та електронно-променевою обробкою, після чого наносили на одну зі сторін шляхом термічного випаровування у вакуумі шар золота, товщиною  $50 \pm 2$  нм.

Зразки по чергово встановлювались на робочу грань скляної призми приладу «Плазмон-6» через імерсійну рідину (з показником заломлення  $n_D = 1,518 \pm 0,0002$ ) та вимірювались їх рефрактометричні характеристики (див. рис. 1). Вимірювались характеристики відбиття випромінювання від границі поділу призми, оптично щільніше середовище з показником заломлення  $n = 1,51287 \pm 0,00065$ , та аналіту (оптично менш щільне середовище, а саме, осушене кімнатне повітря з показником заломлення  $n = 1,000276$  [8]). Для цього осушене кімнатне повітря розміщували у вимірювальній комірці приладу, виготовленої з фторопласту-4 об'ємом 50 мкл.

Внаслідок електронно-променевої обробки спостерігається зсув мінімумів ППР  $\theta_{\text{ППР}}$  в сторону менших кутів, що може бути наслідком зміни показника заломлення перехідних шарів скло-золото, золото-повітря (табл. 1).

Таблиця 1

Резонансні характеристики зразків

№	Потужність опромінення, Вт/мм <sup>2</sup>	$\theta_{\text{ПВВ}}$ , град.	$\theta_{\text{ППР}}$ , град.	$K_{\text{сим}}$	$L$ , мкм	$\delta$ , нм
1	0	41,40	43,78	0,722	8,451432	324,8014
2	27	41,36	43,54	0,830	11,5127	362,5306
3	36	41,28	43,38	0,967	13,99121	359,973

Мінімум ППР за більшої потужності опромінення зміщується в сторону менших кутів на  $0,4$  град., що дозволяє розширити кутовий діапазон визначення (див. рис. 1). Критичний кут  $\theta_{\text{ПВВ}}$  також зміщується на  $0,12$  град., внаслідок підвищення показника заломлення поверхневих шарів скла через випаровування легкоплавких складових під час обробки.

Визначено абсолютну похибку визначення мінімуму характеристики відбиття для вибраних потужностей електронно-променевої обробки скляної підкладки сенсора методами середньої лінії та поліноміальними 2, 3, 4 ступенів, а також вдосконалим методом середньої лінії (табл. 2). Для знаходження абсолютної похибки вимірювань порівнювали  $\theta_{\text{ППР}}$ , розраховані цими методами, зі значеннями мінімуму характеристики відбиття, побудованою з кроком  $0,00001$  градуса. Характеристики відбиття для обробки цими методами побудовані з кроком  $0,02$  градуса (крок сканування приладу «Плазмон-6»).

Таблиця 2

Методи обробки

Потужність опромінення, Вт/мм <sup>2</sup>	Значення абсолютної похибки вимірювань, кут. сек.				
	Апроксимація поліномом 2-го ступеня	Апроксимація поліномом 3-го ступеня	Апроксимація поліномом 4-го ступеня	Метод середньої лінії	Вдосконалений метод середньої лінії
0	165,24	14,76	14,76	10,69	1,80
27	138,60	48,60	27,00	39,24	3,42
36	112,32	38,88	49,68	15,23	0,58

Найбільшу похибку вимірювання забезпечує метод апроксимації поліномом 2-го ступеня для зразків без обробки (табл. 2), що свідчить про доцільність застосування інших методів обробки.

Кращі результати демонструє метод середньої лінії в порівнянні з методами апроксимації поліномами 3 та 4 ступенів. Проте кореляція 0,95 між величинами коефіцієнта відбиття світла в мінімумі характеристики відбиття від абсолютної похибки для методу середньої лінії не дозволяє повністю усунути залежність методу від змін інтенсивності відбитого випромінювання. Тому постала необхідність вдосконалити метод середньої лінії (рис. 2а) шляхом зміщення характеристики відбиття паралельно координатній осі інтенсивності у напрямку до координатній осі кутів падіння на величину абсолютного значення інтенсивності  $\Delta R$  відбитої від границі поділу електромагнітної хвилі в мінімумі графіка (рис. 2б). Зміщення усуває різницю  $\Delta\theta$  та зменшує вплив інтенсивності випромінювання, що сприяє зменшенню похибки для вдосконаленого методу (табл. 2).

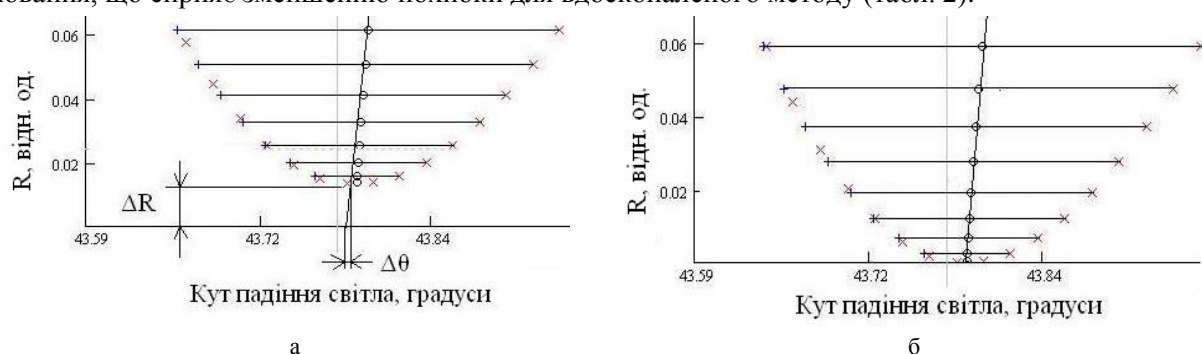


Рис. 2. Спосіб знаходження мінімуму характеристики відбиття: а — методом середньої лінії; б — вдосконалим методом середньої лінії

Абсолютна похибка результату вимірювання в 6 разів зменшена порівняно з методом середньої лінії в результаті застосування вдосконаленого методу середньої лінії для зразків без обробки, та майже в 12 раз зменшена — для зразків з обробкою для потужності 27 Вт/мм<sup>2</sup>. Найменша абсолютна похибка спостерігається для потужності електронно-променевої обробки 36 Вт/мм<sup>2</sup> і становить 0,58 кут. сек. для цього методу, що в 26 раз менше за абсолютну похибку методу середньої лінії. Також досліджено симетричність правого та лівого схилу характеристик відбиття для різної потужності опромінення зразків (див. табл. 1) за допомогою програмного забезпечення Mathcad 14.0. Коефіцієнт симетричності  $K_{\text{сим}}$  визначався як співвідношення значень похідних до правого  $R_{\text{п}}$  й лівого  $R_{\text{л}}$  схилів характеристики відбиття

$$K_{\text{сим}} = \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{л}}}. \quad (1)$$

Також встановлено, що коефіцієнт симетричності корелює з величинами абсолютних похибок для методу апроксимації поліномом 2 ступеня (-0,997) та методу апроксимації поліномом 4 ступеня (0,995), що говорить про залежність методів від форми характеристики відбиття. За більшої потужності опромінення збільшується симетричність схилів характеристики відбиття ППР, що пов'язано зі зменшенням шорсткості поверхні після електронно-променевої обробки та, як наслідок, зменшення загасання поля поверхневих плазмонів. Це підтверджено розрахованими оптичними константами за вимірними характеристиками ППР. Оптичні константи ( $n$  — показник заломлення середовища,  $k$  — коефіцієнт загасання,  $d$  — товщина шару) розраховані за характеристиками відбиття для трьох зразків за допомогою програмного пакету Winspall 3.0 (табл. 3).

Таблиця 3

#### Оптичні константи

Потужність опромінення, Вт/мм <sup>2</sup>	Призма	Перехідний шар скло-метал			Шар металу			Перехідний шар метал-аналіт			Аналіт
	$n$	$n$	$k$	$d$ , нм	$n_m$	$k_m$	$d$ , нм	$n$	$k$	$d$ , нм	$n_a$
0	1,512870	0,0828	2,7506	0,49	0,1891	3,3010	47,21	0,3079	4,1981	3,38	1,00032
27	1,514300	0,1274	4,5388	1,33	0,1931	3,6502	44,59	0,8151	3,7375	1,85	1,00036
36	1,516470	0,1579	4,9983	0,82	0,1556	3,6242	46,53	0,7887	4,2605	1,37	1,00030

За розрахованими оптичними константами визначено відстань розповсюдження  $L$  та глибину проникнення поля поверхневих плазмонів в аналіт  $\delta_a$  для довжини хвилі  $\lambda = 650$  нм (довжина

хвилі джерела випромінювання для приладу Плазмон-6) (табл. 1). Глибина проникнення поля поверхневих плазмонів та відстань розповсюдження визначається як [6]

$$\delta_a = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_{mr}}{-\varepsilon_a^2}}; \quad (2)$$

$$L = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\varepsilon_{mr}^2}{\varepsilon_{mi}} \left( \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_{mr}}{\varepsilon_a \cdot \varepsilon_{mr}} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon_a$  — діелектрична проникність аналіту (в нашому випадку діелектрика на поверхні плазмонно-сійного шару) та визначається як  $\varepsilon_a = n_a^2$ ;  $\varepsilon_{mr}$  — дійсна складова діелектричної проникності провідного середовища (металу) та визначається як  $\varepsilon_{mr} = n_m + k_m$ ;  $\varepsilon_{mi}$  — уявна складова діелектричної проникності металу та визначається як  $\varepsilon_{mi} = 2n_m k_m$ .

За більшої потужності опромінення, збільшується відстань розповсюдження поверхневих плазмонів (табл. 1) внаслідок зменшення втрат при розповсюдженні поверхневих плазмонів вздовж границі метал-повітря. Причиною зменшення втрат стала більша однорідність поверхні металеві золоті плівки, більша її щільність та менша нанощорсткість поверхні та товщина перехідного шару золото-повітря. Внаслідок електронно-променевої обробки скляної підкладки зменшується товщина перехідного шару метал-аналіт (табл. 3), що вказує на зменшення шорсткості. Поверхнева шорсткість металу суттєво впливає на розповсюдження поверхневих плазмонів та призводить, внаслідок розсіювання енергії, до передчасного загасання плазмонів та зменшення їх фазової швидкості. Глибина проникнення поля має найменше значення для необроблених зразків за рахунок дефектів як на поверхні, так і приповерхневому шарі металу, що також пов'язано з загасанням поверхневих плазмонів.

### Висновки

За результатами експериментів та чисельного аналізу встановлено, що вплив електронно-променевої обробки на точність визначення кутового положення мінімуму характеристики відбиття суттєво залежить від вибраного чисельного методу. Досліджено вплив методів обробки результатів, а саме: методів апроксимації поліномами 2-го, 3-го та 4-го ступенів, методу середньої лінії та вдосконаленим методом середньої лінії, на абсолютну похибку вимірювання для трьох сенсорів з різною питомою потужністю електронно-променевої обробки поверхні скляних підкладок: 0, 27 та 36 Вт/мм<sup>2</sup>. Вдосконалений метод середньої лінії має найменшу абсолютну похибку вимірювання порівняно з іншими методами, що говорить про доцільність застосування нового методу. Абсолютна похибка результату вимірювання для вдосконаленого методу зменшена порівняно з методом середньої лінії для зразків без обробки в 6 разів, для зразків з обробкою для потужності 27 Вт/мм<sup>2</sup> — майже в 12 разів. Найменша абсолютна похибка спостерігається для потужності електронно-променевої обробки 36 Вт/мм<sup>2</sup> і становить 0,58 кут. сек. для цього методу, що в 26 разів менше за абсолютну похибку методу середньої лінії. Це пояснюється меншою залежністю від симетричності характеристики відбиття та від змін величини інтенсивності відбитого світла в мінімумі характеристики відбиття. Застосування електронно-променевої обробки поверхні скляних підкладок сенсорів на основі ППР привело до зміни кутового положення мінімуму рефрактометричних характеристик: мінімум зсунувся в сторону менших кутів на 0,4 кут. град. за більшої потужності опромінення внаслідок зміни показника заломлення перехідних шарів, що дозволяє розширити кутовий діапазон визначення. За більшої потужності опромінення збільшується симетричність схилів характеристики відбиття ППР, відстань розповсюдження і глибина проникнення поверхневих плазмонів, що пов'язано зі зменшенням шорсткості поверхні після електронно-променевої обробки та, як наслідок, зменшення загасання поля поверхневих плазмонів. Це підтверджено розрахованими оптичними константами за виміряними характеристиками.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] И. Д. Войтович, *Сенсоры на основе плазмонного резонанса: принципы, технологии, применения*. Киев, Украина: Сталь, 2011, 534 с.

[2] V. A. Vashchenko, et al., “Effect of electron-beam treatment of sensor glass substrates for SPR devices on their metrological characteristics,” *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, vol. 22, no. 4, pp. 444-451, 2019. <https://doi.org/10.15407/spqeo22.04.444>.

[3] T. M. Chinowsky, L. S. Jung, and S. S. Yee, “Optimal linear data analysis for surface plasmon resonance biosensors,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 54, pp. 89-97, 1999.

[4] Z. Wang, et al., “An accurate and precise polynomial model of angular interrogation surface plasmon resonance data,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 151, no. 2, pp. 309-319, 2011.

[5] V. Maslov, Yu. Ushenin, G. Dorozinsky, A. Dorozinska, and A. Kudryavtsev, “New method for determining the angular position of the light reflection intensity minimum observed in surface plasmon resonance,” *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, vol. 3, no. 3, pp. 1514-1518, 2017.

[6] A. Shalabney, and I. Abdulhalim, “Sensitivity-enhancement methods for surface plasmon sensors,” *Laser Photonics Rev.*, vol. 5, no. 4, pp. 571-606, 2011.

[7] Г. В. Дорожинський, В. П. Маслов, і Ю. В. Ушенін, *Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмонного резонансу*. Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2016, 264 с.

[8] P. E. Ciddor, “Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared,” *Appl. Optics*, vol. 35, pp. 1566-1573, 1996.

Рекомендована кафедрою радіотехніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.02.2020

**Дорожинська Ганна Василівна** — аспірантка кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, e-mail: [annakushnir30@ukr.net](mailto:annakushnir30@ukr.net).

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Київ

**H. V. Dorozinska<sup>1</sup>**

## Evaluation Numerical Methods Effectiveness for Processing of Measurement Results by Improved SPR-Sensor

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

*In this work there has been investigated the effect of electron beam treatment of the glass substrates surface of sensors based on surface plasmon resonance phenomenon with active gold based layer on the accuracy of determining the angular position of the reflection characteristics in case applying numerical methods for processing direct measurement results: approximation by polynomials of the 2nd 3rd and 4th degrees and processing by midline method. Sensors with different specific powers of electron beam treatment of glass substrates were investigated: 0, 27, and 36 W/mm<sup>2</sup>. The reflection characteristics for the gold-air interface were investigated. According to the results of experiments and numerical analysis, it was found that the effect of electron beam treatment on the change in the absolute error in determining the minimum reflection characteristics substantially depends on the chosen numerical method. Thus, the improved midline method provides a 6-fold decrease in the absolute measurement error compared to the midline method for samples without processing and almost 12 times for samples with processing power of 27 W/mm<sup>2</sup>. Moreover, for this method, the smallest absolute error is observed for the power of electron beam treatment 36 W/mm<sup>2</sup> and is 0,58 arc sec., which indicates the appropriateness of applying new method. Compared to the approximation methods by polynomials and the midline method, the improved midline method has greater accuracy in determining the minimum reflection characteristics because it depends less on not only its symmetry associated with the optical characteristics of the gold-air transition layer, but also on changes in the intensity of reflected light minimum reflection characteristics. According to the results of calculations based on predefined optical constants from the measured reflection characteristics, it was found that, with a higher irradiation power, the symmetry of the reflection characteristic, the propagation distance and the penetration depth of surface plasmons increase, which is associated with a decrease in surface roughness after electron beam treatment and, as a consequence, a decrease in attenuation fields of surface plasmons. Research can be useful in the development of sensors based on surface plasmon resonance phenomenon and methods for processing measurement results.*

**Keywords:** reflection characteristic, electron beam treatment, surface plasmon resonance, angular position error.

**Dorozinska Hanna V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Information and Measurement Technologies, e-mail: [annakushnir30@ukr.net](mailto:annakushnir30@ukr.net)

А. В. Дорожинская<sup>1</sup>

## Оценка эффективности численных методов для обработки результатов измерения усовершенствованным ППР-сенсором

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Проведены исследования влияния электронно-лучевой обработки поверхности стеклянных подложек сенсоров на основе явления поверхностного плазмонного резонанса с плазмоннесущим слоем золота на точность определения углового положения минимума характеристики отражения с применением численных методов обработки результатов прямых измерений, а именно: методов аппроксимации полиномами 2-й, 3-й и 4-й степеней и метода средней линии. Исследованы сенсоры с разной удельной мощностью электронно-лучевой обработки поверхности стеклянных подложек: 0, 27 и 36 Вт/мм<sup>2</sup>. Исследовали характеристики отражения для границы золото-воздух. По результатам экспериментов и численного анализа установлено, что влияние электронно-лучевой обработки на изменение абсолютной погрешности определения минимума характеристики отражения существенно зависит от выбранного численного метода. Так усовершенствованный метод средней линии обеспечивает уменьшение абсолютной погрешности измерения по сравнению с методом средней линии в 6 раз для образцов без обработки и почти в 12 раз — для образцов с обработкой мощностью 27 Вт/мм<sup>2</sup>. При этом для этого метода наименьшая абсолютная погрешность наблюдается для мощности электронно-лучевой обработки 36 Вт/мм<sup>2</sup> и составляет 0,58 угл. с., что говорит о целесообразности применения нового метода. По сравнению с методами аппроксимации полиномами и методом средней линии усовершенствованный метод средней линии имеет большую точность определения минимума характеристики отражения потому, что меньше зависит не только от ее симметричности, связанной с оптическими характеристиками переходного слоя золото-воздух, но и от изменений величины интенсивности отраженного света в минимуме характеристики отражения. По результатам расчетов на основе предварительно определенных оптических констант по измеренным характеристикам отражения установлено, что при большей мощности облучения увеличивается симметричность характеристики отражения, расстояние распространения и глубина проникновения поверхностных плазмонов. Это связано с уменьшением шероховатости поверхности после электронно-лучевой обработки и, как следствие, уменьшением затухания поля поверхностных плазмонов. Исследования могут быть полезными при разработке сенсоров на основе явления поверхностного плазмонного резонанса и методов обработки результатов измерения.

**Ключевые слова:** характеристика отражения, электронно-лучевая обработка, поверхностный плазмонный резонанс, угловое положение минимума характеристики отражения.

*Дорожинская Анна Васильевна* — аспирант кафедры информационно-измерительных технологий, e-mail: annakushnir30@ukr.net