

УДК 535-7, 535.016, 53.043

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.4>

ВЛАСТИВОСТІ СЕНСОРІВ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСУ З ПІДШАРОМ ІТО

Дорожинська Г. В. – Ph.D.,

асистент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-9352-3761

Федоренко А. В. – Ph.D., молодший науковий співробітник

Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0001-6201-6129

Дорожинський Г. В. – кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-7881-2493

Маслов В. П. – доктор технічних наук, професор,

завідувач відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства
Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0001-7795-6156

В результаті досліджень оптичних та електричних властивостей ППР-сенсорів з додатковим підшаром ІТО визначено вплив цього підшару на кутове положення плазмонного резонансу та на значення діелектричної проникності металевого шару. Досліджувались наступні оптичні та електричні характеристики: спектри пропускання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль, резонансний кут рефрактометричних характеристик, абсолютні діелектричні проникності підшару ІТО оптимальної структури, вольт-ватні характеристики плівки ІТО, а також температурні залежності кутового положення резонансного кута при самонагріванні структури. Також досліджувалось ефективність застосування плівкового нагрівача у порівнянні з резистивним об'ємним. За результатами чисельного моделювання рефрактометричних характеристик ППР наноструктур «ІТО-Ау-ПТФЕ» в діапазоні довжин хвиль від 500 до 1600 нм було встановлено, що збільшення товщини ІТО практично не впливає на зсув кутового положення резонансу (0,4 кут.сек./нм), а зростання товщини плівки ПТФЕ суттєво його зсуває (0,33 град./нм). Експериментальні дослідження показали вплив наявності підшару ІТО оптимальної товщини, як на кутове положення плазмонного резонансу, так і на значення діелектричної проникності плазмонзбуджуючого шару. Визначено оптимальні товщини для шарів ІТО (66 нм) та ПТФЕ (від 10 нм до 40 нм). Середні значення уявної складової абсолютної діелектричної проникності ϵ_{ai} зменшилось на 10% з 9,548 пФ/м до 8,554 пФ/м, що позитивно вплинуло на зменшення втрат. Встановлено нелінійну залежність резонансного кута від температури самонагрівання наноструктури: спочатку значення резонансного кута зменшувалось, а потім при температурі 47 °С – резонансний кут зростає, що свідчило про зміну оптичних констант шарів чутливого елемента ППР-сенсора. Проведені дослідження дозволяють вдосконалити процес розробки оптоелектронних ППР-приладів та перспективних для дослідження напівпровідникових матеріалів для наноплазмоніки.

Ключові слова: поверхневий плазмонний резонанс, ІТО, політетрафторетилен.

Dorozinska H. V., Fedorenko A. V., Dorozinsky G. V., Maslov V. P. Properties of surface plasmon resonance sensors with ito layer

As a result of studies of optical and electrical properties of SPR sensors with an additional ITO sublayer, the influence of this sublayer on the angular position of the plasmon resonance and on the value of the dielectric constant of the metal layer was determined. The following optical and electrical characteristics were studied: transmission spectra in the visible and near infrared wavelength range, resonant angle of refractometric characteristics, absolute dielectric constant of the corresponding nanostructure layers, volt-watt characteristics of ITO film, and temperature dependences of the angular position. The effectiveness of the film heater compared to the resistive volume heater was also studied. According to the results of numerical modeling of refractometric characteristics of SPR nanostructures "ITO-Au-PTFE" in the wavelength range from 500 to 1600 nm, it was found that increasing the thickness of ITO has little effect on the shift of the angular position of the resonance (0.4 angular sec / nm), and increasing the thickness of the PTFE film significantly shifts it (0.33 deg./nm). Experimental studies have shown the effect of the presence of the ITO sublayer of optimal thickness, both on the angular position of the plasmon resonance and on the value of the dielectric constant of the plasmon excitation layer. The optimal thicknesses for the ITO (66 nm) and PTFE layers (from 10 nm to 40 nm) were determined. The average value of the apparent component of the absolute dielectric constant ϵ_{ai} decreased by 10% from 9,548 pF / m to 8,554 pF / m, which had a positive effect on the reduction of losses. The nonlinear dependence of the resonance angle on the nanostructure self-heating temperature was established: first the value of the resonance angle decreased, and then at 47 °C the resonance angle increased, which indicates the change of optical constants of the SPR sensor sensing element layers. The conducted researches allow to improve the process of development of optoelectronic SPR devices and are perspective for research of semiconductor materials for nanoplasmonics.

Key words: surface plasmon resonance, ITO, polytetrafluoroethylene.

Вступ. Розроблення високих технологій напівпровідникових матеріалів, оптоелектронних приладів, сенсорних інтелектуальних систем є провідним напрямком технологічного оновлення різних галузей економіки. Широкого використання набули оптоелектронні прилади з використанням хімічних та біологічних сенсорів, які складаються з чутливого елемента та фізичного перетворювача [1]. Зокрема, прилади на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР) є перспективним оптичним методом аналізу. В якості чутливих елементів таких приладів застосовуються дорогі метали, а саме: срібло та золото [2]. В якості додаткового шару застосовують провідникові оксиди. Оксиди металів покривають шари золота або срібла для посилення адсорбційних властивостей і хвилеводного посилення відгуку сенсора на зміну показника заломлення аналіту [3]. Одним з перспективних матеріалів для наноплазмоніки є напівпровідник ІТО ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}$), тонкі плівки якого переважно використовують в якості прозорих електродів для сонячних елементів [4]. Нещодавно [5] було заявлено про застосування наноструктурованих плівок ІТО для збудження ППР для р-поляризованого падаючого світла. Для зменшення взаємного впливу поверхні сенсора та досліджуваного середовища, а також для довготривалого використання сенсора, його додатково покривають інертним захисним шаром, наприклад, політетрафторетиленом (ПТФЕ). Плівки ПТФЕ використовуються як захисні, антифрикційні і діелектричні шари [6]. Додатковий шар ПТФЕ використовують в сенсорах на основі ППР як в ролі проміжного шару між призмою та металом – цитопу – для збудження довгопробіжних поверхневих плазмонів [7], так і як верхній шар-фільтр для виділення дрібних молекул у водних розчинах [8]. В нашій попередній роботі [9] показано ефективність застосування плівки ПТФЕ у газовому ППР-сенсорі при дослідженні випарів органічних розчинників.

Як показано в попередніх роботах [10; 11], врахування температурного фактора є суттєвим для підвищення точності вимірювань при використанні ППР-приладів.

Для зменшення впливу температурного фактора на результати вимірювань показника заломлення застосовують методи термостабілізації та термічної компенсації. Термічна стабілізація – це підтримання заданої температури пристрою, а також резервуарів з аналітами [12], що забезпечується резистивними нагрівачами та/або елементами Пельтьє. Для розширення діапазону регулювання температури та швидкого реагування слід збільшити споживану ними електроенергію. Однак це призводить до збільшення розмірів і потужності, споживаної SPR-пристроями, а також часу на передачу тепла від обігрівача. Термічна компенсація зменшує лише температурний дрейф, і вона ефективна лише в стаціонарних температурних режимах [13]. Наявність в ІТО електричної провідності дозволяє застосовувати його у якості плівкового нагрівача нанорозмірної товщини [14].

Метою роботи було дослідження оптичних та електричних властивостей ППР-сенсора до складу чутливого елемента якого, окрім плазмон-носійного шару золота, входить адсорбційний зовнішній шар ПТФЕ та тонкоплівковий нагрівач у вигляді нанорозмірної плівки ІТО розташованої під шаром золота.

Методи та матеріали. Для визначення оптимальної товщини підшару ІТО та верхнього шару ПТФЕ було виконано чисельне моделювання та побудову теоретичної рефрактометричної характеристики для багатошарової системи і р-поляризованого монохроматичного падаючого випромінювання для довжини хвилі 650 нм. Рефрактометричну характеристику розраховували як функцію кута падіння, використовуючи формули Френеля і математичний формалізм матриць розсіювання Джонса [15], на основі методики [16].

Композиційні тонкі плівки ІТО (In_2O_3 -20%; SnO_2 -80%) оптимальної товщини формували магнетронним осадженням на підкладки зі скла марки К8 товщиною 1 мм і розмірами 20×20 мм. Потім після нанесення шару ІТО (крім референтних) на одну зі сторін скляних пластинок було осаджено шар золота товщиною 48 ± 5 нм термічним випаровуванням у вакуумі на обладнанні ВУП-5М зі швидкістю 5...6 нм/сек при залишковому тиску 2×10^{-5} Па. Товщина плівок контролювалась в процесі нанесення приладом КИТ-1. Плівки ПТФЕ осаджувались термічним випаровуванням у вакуумі на обладнанні УВН-74 зі швидкістю 2...4 нм/сек при залишковому тиску $(3...4) \times 10^{-2}$ Па. Товщина плівок контролювалась в процесі нанесення приладом Sigma Instruments SQM – 242 з похибкою вимірювання $\pm 0,01$ нм. Для експериментального визначення впливу підшару ІТО на оптичні характеристики ППР-сенсорів було виготовлено 8 зразків: 4 основні «ІТО-Ау-ПТФЕ» та 4 референтні «Ау-ПТФЕ» з різною товщиною плівки ПТФЕ 0, 10, 20 та 30 нм. Також для порівняння було досліджено 2 зразки без шару ПТФЕ: «ІТО-Ау» та «Ау».

Досліджувались наступні оптичні та електричні характеристики: спектри пропускання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль, резонансний кут рефрактометричних характеристик, абсолютні діелектричні проникності відповідних шарів наноструктури, вольт-ватні характеристики плівки ІТО, а також температурні залежності кутового положення резонансного кута при самонагріванні структури. Також досліджувалось ефективність застосування плівкового нагрівача у порівнянні з резистивним об'ємним.

Спектри пропускання були виміряні спектрофотометром MAPADA UV1600. Рефрактометричні характеристики ППР для досліджуваних зразків були виміряні ППР-приладом «Плазмон-6», розробленим в Інституті фізики напівпровідників імені В.С.Лашкарьова НАН України. Довжина хвилі випромінювання напівпровідникового лазера приладу для збудження поверхневих плазмонів становила 650 нм. Рефрактометр працював в режимі періодичного кутового сканування

та одночасного запису мінімуму рефрактометричної характеристики. Зразки по черзі встановлювались на робочу грань скляної напівпентапризми приладу «Плазмон-6», яка була виготовлена з оптичного скла марки К8 через імерсійну рідину (масло імерсійне ТУ 9398-011-29508133-2009, $n_D = 1,5175 \pm 0,0002$) та вимірювались їх рефрактометричні характеристики. В якості досліджуваного середовища використовували кімнатне повітря. Дослідження проводились за нормальних умов ($P=10^5$ Па, $T=293$ К). За вимірними рефрактометричними характеристиками визначались критичний та резонансний кути.

При дослідженні наноструктур з тонкими плівками ІТО в якості нагрівачів визначали споживану ними потужність по вимірним вольт-амперним характеристикам, з одночасним вимірюванням приросту їх температури за рахунок самонагрівання. Напругу на зразок подавали від блоку живлення потужністю 10 Вт з плавним регулюванням вихідної напруги від 1,5 до 31 В з похибкою $\pm 0,1$ В. Електричний контакт між джерелом напруги і плівкою ІТО забезпечували мідними пластинами завтовшки 0,3 мм розмірами 18×2 мм, до яких під'єднували щупи джерела напруги. Для вимірювання напруги і струму через зразок застосовувалися цифрові вольтметри DT-830В з похибкою вимірювання напруги 0,5%. Температуру вимірювали вольтметром DT-838 з термопарою, яка контактувала з поверхнею композитної плівки. Похибка вимірювання температури становила $\pm 0,2$ К. Також проводили аналогічні вимірювання при пасивному нагріві зразків без прикладання напруги. Для цього застосовували резистивний нагрівач з константану (опір нагрівача 42 Ома при $T=20^\circ\text{C}$), який живився напругою 12 В та був вбудований у вимірювальну кювету приладу «Плазмон-6», яка розташовувалась безпосередньо над досліджуваною структурою. Для вимірювання температури поверхні структури у вимірювальну кювету приладу було вбудовано резистивний сенсор температури M222Pt100 (Heraeus Sensor Technology, Німеччина) з лінійною температурною характеристикою в діапазоні від -203 К до $+773$ К і початковим опором 1 кОм при температурі 293 К (DIN EN6075, IEC 751).

Результати та дискусія. Для визначення оптимальної товщини шарів ІТО та ПТФЕ по відношенню до діапазону вимірювання кутів приладом «Плазмон-6» було виконано чисельне моделювання рефрактометричних характеристик наноструктури «ІТО-Au-ПТФЕ» при зміні товщини ІТО від 5 до 300 нм за постійної товщини ПТФЕ у 30 нм, а також при зміні товщини ПТФЕ від 5 до 60 нм за постійної товщини ІТО (66 нм). Залежність кутового положення мінімуму рефрактометричної характеристики від товщини ПТФЕ наведено на рисунку 1, а. Залежність динамічного діапазону вимірювання резонансних кутів при режимі вимірювання на схилі рефрактометричної характеристики наведено на рисунку 1, б.

Діапазон вимірювання резонансних кутів приладом становив 38...56 градусів, для якого можливо записати повну рефрактометричну характеристику, а не лише її мінімум, що необхідно для коректного визначення оптичних констант шарів. Тому оптимальний діапазон товщини ПТФЕ становить до 40 нм, а оптимальна товщина шару ІТО становить 66 нм, що забезпечує найбільший динамічний діапазон вимірювання кута ППР в діапазоні товщини ІТО 0...200 нм. Результати моделювання показали, що збільшення товщини ІТО практично не впливало на кутове положення резонансу (0,4 кут.сек./нм), в той час як збільшення товщини плівки ПТФЕ суттєво зсувало резонансний кут (0,33 град./нм).

Вимірні спектри пропускання структур «ІТО-Au-ПТФЕ» та «Au-ПТФЕ» при наявності та відсутності діелектричного шару товщиною 30 нм наведено на рисунку 2.

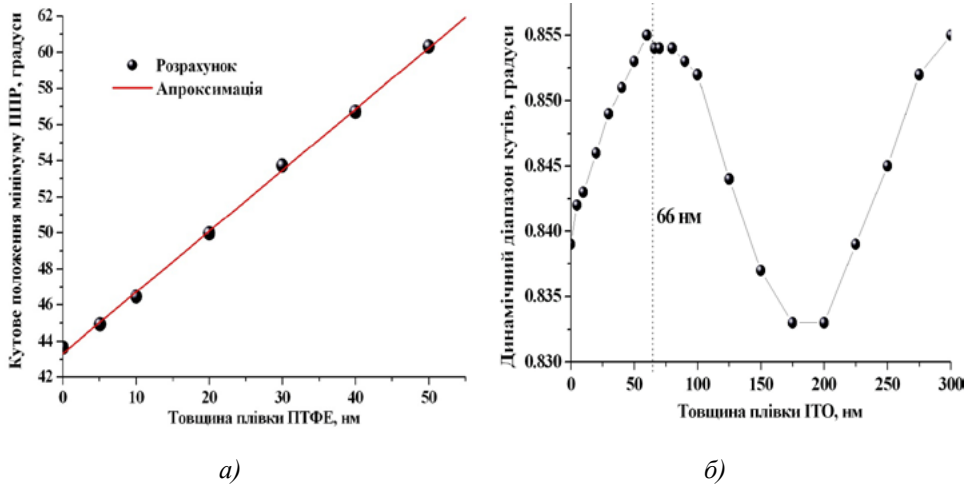


Рис. 1. Розраховані залежність мінімуму рефрактометричної характеристики від товщини ПТФЕ (а) та динамічного діапазону кутів ППР від товщини ІТО (б)

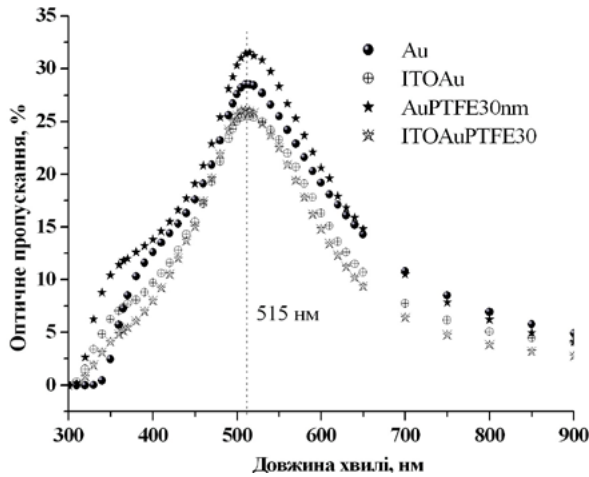


Рис. 2. Спектри пропускання для структур «ІТО-Ау-ПТФЕ» та «Ау-ПТФЕ» для товщини шару політетрафторетилену 30 нм

Залежності зсуву максимуму коефіцієнту пропускання на довжині хвилі 515 нм від товщини шару ПТФЕ зображено на рисунку 3.

Результати аналізу спектрів пропускання свідчать про ефект оптичного просвітлення при застосуванні ПТФЕ, тому навіть при наявності поглинаючої плівки ІТО інтенсивність оптичного пропускання зростала.

По вимірним рефрактометричним характеристикам було визначено значення резонансних кутів та розраховано значення абсолютної діелектричної проникності ϵ_a для відповідних шарів наноструктур. Графіки залежності кутового положення резонансу від товщини шару ПТФЕ мали лінійний характер і для «ІТО-Ау-ПТФЕ» та «Ау-ПТФЕ» були зсунуті один відносно одного на величину приблизно 2 градуси (Рис. 4).

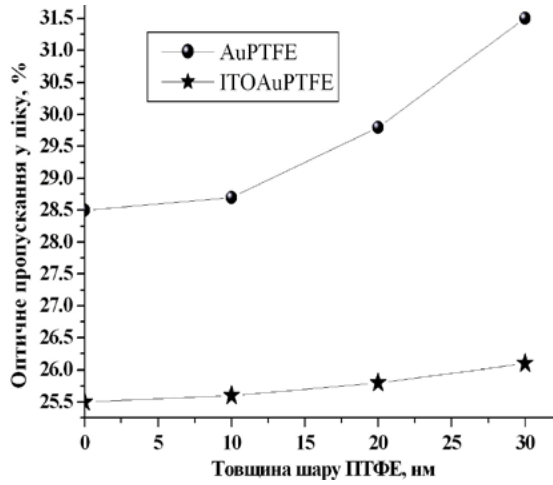


Рис. 3. Залежність коефіцієнта оптичного пропускання на довжині хвилі 515 нм для структур «ІТО-Ау-ПТФЕ» та «Ау-ПТФЕ» від товщини ПТФЕ

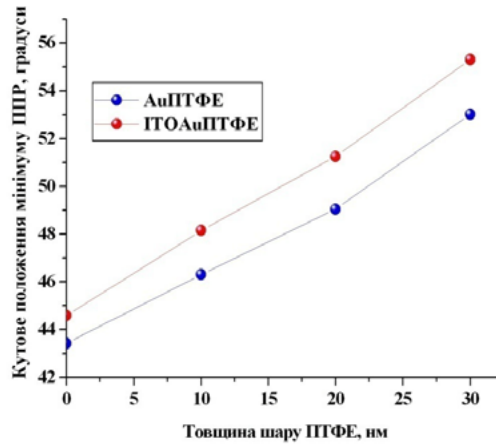


Рис. 4. Залежність кутового положення мінімуму ПТР від товщини зовнішнього шару ПТФЕ для структур «ІТО-Ау-ПТФЕ» та «Ау-ПТФЕ»

Розраховані значення абсолютної діелектричної проникності наведені в Таблиці 1. В таблиці наведені дійсна ϵ_{ar} та уявна ϵ_{ai} складові комплексної діелектричної проникності.

Таблиця 1

Розрахована діелектрична проникність шарів наноструктури

Товщина ПТФЕ, нм	Абсолютна діелектрична проникність шарів структури ϵ_a , пФ/м							
	Структура «Ау-ПТФЕ»			Структура «ІТО-Ау-ПТФЕ»				
	ϵ_a ПТФЕ	ϵ_{ar} Au	ϵ_{ai} Au	ϵ_{ar} ІТО	ϵ_{ai} ІТО	ϵ_a ПТФЕ	ϵ_{ar} Au	ϵ_{ai} Au
0	-	-109,23	8,403	3,116	0,012	-	-75,422	9,165
10	15,5443	-123,05	11,433			15,5208	-85,821	8,335
20	15,8035	-121,51	8,731			15,7562	-90,713	8,057
30	15,8745	-122,53	9,625			15,8271	-86,804	8,660

Наявність підшару ІТО призводить до зменшення середнього значення уявної складової абсолютної діелектричної проникності ϵ_{ai} на 10% з 9,548 пФ/м до 8,554 пФ/м, що може бути пов'язано з процесом росту плівки золота на підкладці з ІТО та без нього.

За вимірними вольт-амперними характеристиками були розраховані залежності теплової потужності, яка спостерігається на зразках, від прикладеної до них напруги (Рис. 5). На рисунку 6 показано вимірні залежності температури поверхні зразка від напруги прикладеної до нього за різної тривалості нагріву 0,5, 1 та 5 хвилин. Результати поточних досліджень були порівняні з попередніми нашими дослідження для плівок ІТО в роботі [14]. Зростання розсіюваної зразком потужності пов'язано зі збільшенням струму через зразок внаслідок електричного шунтування плівки ІТО плівкою золота. Порівняння вольт-ватних характеристик показало зменшення питомого опору у 1,8 рази з 38 мОм·см до 21 мОм·см при наявності зовнішніх шарів золота та ПТФЕ. При цьому для структури ІТО-Au була більша швидкість самонагрівання ($3,6^{\circ}\text{C}/\text{хв}$), ніж для плівки ІТО без золота ($2,5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$).

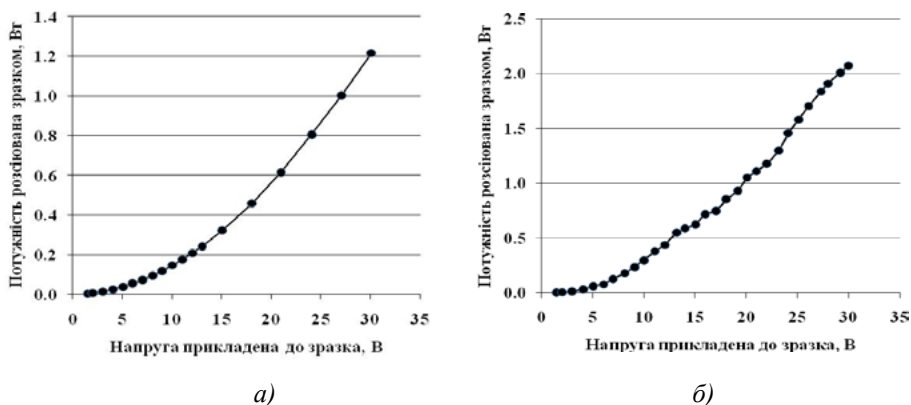


Рис. 5. Залежність потужності, що розсіюється зразком, від напруги прикладеної до нього для ІТО без додаткових зовнішніх шарів [14] (а) та з ними (б).

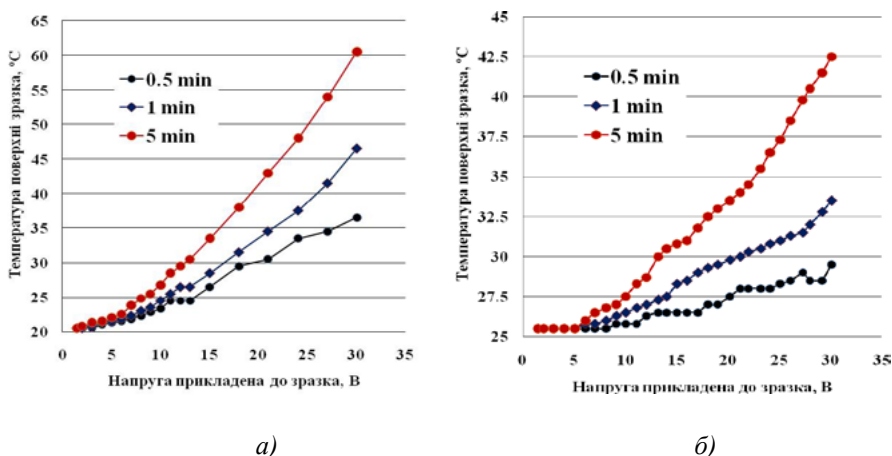


Рис. 6. Залежність температури поверхні зразків від напруги прикладеної до плівки ІТО без додаткових зовнішніх шарів [14] (а) та з ними (б)

Для дослідження впливу температури нагріву на оптичні характеристики наноструктур вимірювали залежності кутового положення мінімуму рефрактометричної характеристики від температури. Для зменшення впливу коливання температури довкілля прилад під час вимірювання розташовували в термобоксі, в якому підтримували температуру 20°C. Вимірні залежності мають дві характерні ділянки: одна в діапазоні температур від 25°C до 47°C, а інша від 47°C до 52°C (Рис. 7). На першій ділянці характеристика має спадаючий характер, а на другій зростаючий.

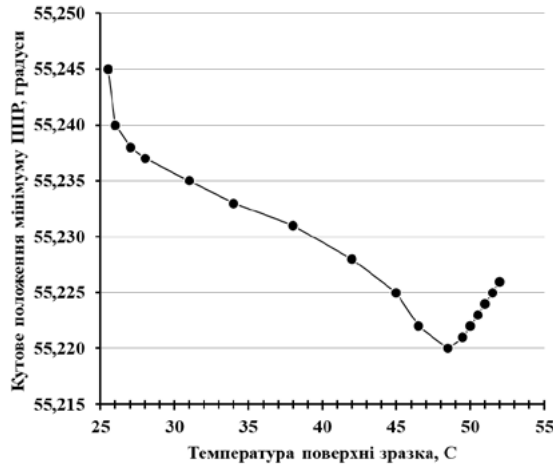


Рис. 7. Залежність кутового положення резонансного кута від температури нагріву

Таке явище можна пояснити дією двох чинників на зміну показника заломлення зразків, що визначає кутове положення мінімуму рефрактометричної характеристики при ППР. Одним чинником був дрейфовий струм носіїв заряду через зразок, а другим чинником – температурна залежність показника заломлення. Тому, поки температура зразка невисока, переважаючим є перший чинник, а при досягненні певної критичної температури (47°C) головну роль починає відігравати вплив температури.

Для визначення ефективності застосування плівки ІТО в якості нагрівача було визначено швидкість нагріву до температури +55°C та споживана потужність при фіксованій напрузі живлення (30 В) і порівняно з споживаною потужністю резистивним нагрівачем при досягненні аналогічної температури. При застосуванні плівки ІТО як нагрівача поверхня зразка за 20 хвилин при потужності споживання 2,3 Вт нагрілась до температури 54,8°C, а резистивному нагрівачу для досягнення температури у 55°C була необхідна потужність 3,4 Вт при напрузі 12 В. Таким чином, використання плівкового нагрівача дозволило зменшити потужність споживання більш ніж в 1,5 рази.

Висновки. Проведено теоретико-експериментальне дослідження оптичних та електричних властивостей ППР-сенсорів з додатковим підшаром ІТО. Для цього було виконано чисельного моделювання рефрактометричних характеристик ППР наноструктур «ІТО-Ау-ПТФЕ» в діапазоні довжин хвиль збудження поверхневих плазмонів від 500 до 1600 нм, за результатами якого було встановлено, що збільшення товщини ІТО практично не впливає на зсув кутового положення

резонансу (0,4 кут.сек./нм), а зростання товщини плівки ПТФЕ суттєво його зсуває (0,33 град./нм). Також було визначено оптимальні товщини для шарів ІТО (66 нм) та ПТФЕ (від 10 нм до 40 нм). Експериментальні дослідження показали вплив наявності підшару ІТО оптимальної товщини, як на кутове положення плазмонного резонансу, так і на значення діелектричної проникності плазмонзбуджуючого шару. Незалежно від товщини зовнішнього шару ПТФЕ резонанс зміщувався приблизно на 2 градуси у сторону більших кутів, а середнє значення уявної складової абсолютної діелектричної проникності ε_{ai} зменшилось на 10% з 9,548 пФ/м до 8,554 пФ/м. Також було встановлено нелінійну залежність резонансного кута від температури самонагрівання наноструктури: спочатку значення резонансного кута зменшувалось, а потім при температурі 47°C – резонансний кут зростає.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Homola, J., Yee, S. and Gauglitz, G. Surface plasmon resonance sensors: review, *Sensors and Actuators B* 54, (1999) 3–15.
2. Yu.M. Shirshov, A.V. Samoylov, S.A. Zinyo, E.R. Surovceva, V.Mirskiy, “Bimetallic layers increase sensitivity of affinity sensors based on surface plasmon resonance”, *Sensors*, 2002, p. 62–70.
3. Nan-Fu Chiu, Yi-Chen Tu, Teng-Yi Huang, “Enhanced Sensitivity of Anti-Symmetrically Structured Surface Plasmon Resonance Sensors with Zinc Oxide Intermediate Layers”, *Sensors*, 2014, p. 170–187.
4. D. A. Grynko, A. N. Fedoryak, P. S. Smertenko, O. P. Dimitriev, N. A. Ogurtsov and A. A. Pud, “Hybrid solar cell on a carbon fiber”, *Nanoscale Research Letters*, Springer, 2016, pp. 265–273.
5. Innem V. A. K. Reddy, Josep M. Jornet, Alexander Baev, and Paras N. Prasad, “Extreme local field enhancement by hybrid epsilon-near-zero-plasmon mode in thin films of transparent conductive oxides,” *Opt. Lett.* 45, 5744–5747 (2020)
6. K. Grytsenko, Yu. Kolomzarov, P. Lytvyn, [et al.]. Effect of magnetic field on film formation by means of polytetrafluoroethylene decomposition in vacuum, *MATERIALS, TECHNOLOGIES, TOOLS – 2011*, 16, No4, p. 56–59.
7. Hastings J. T., Guo J., Keathley P. D., Kumares P. B., Wei Y., Law S., and Bachas L. G. Optimal self-referenced sensing using long- and short- range surface plasmons. *Optics express*. 2007. 15, No 26. P. 17661–17672.
8. Masaru Mitsushio, Akimichi Nagaura, Toshifumi Yoshidome, Morihide Higo. Molecular selectivity development of Teflon® AF1600-coated gold-deposited surface plasmon resonance-based glass rod sensor. *Progress in Organic Coatings*. 2015. 79. P. 62–67.
9. Дорожинська Г.В., Дорожинський Г.В., Маслов В.П., Гриценко К.П., Коломзаров Ю.В., Литвин П.М., Дорошенко Т.П. Особливості застосування додаткового нанощару політетрафторетилену у сенсорах на основі явища поверхневого плазмонного резонансу. *Оптоелектроника и полупроводниковая техника*, № 54 (2019). 88–95.
10. S. K. Ozdemir, G. Turhan-Sayan, “Temperature Effects on Surface Plasmon Resonance: Design Considerations for an Optical Temperature Sensor”, *Journal of light wave technology*, 2003, p. 805–815.
11. Anuj K. Sharma and Banshi D. Gupta, "Influence of temperature on the sensitivity and signal-to-noise ratio of a fiber-optic surface-plasmon resonance sensor," *Appl. Opt.* 45, 151–161 (2006).
12. G. Dorozinsky, V. Maslov, A. Samoylov, Yu. Ushenin, “Reducing measurement uncertainty of instruments based on the phenomenon of surface plasmon resonance”, *American Journal of Optics and Photonics*, 2013, p. 17–22.
13. Yu.V. Ushenin, V.P. Maslov, T.A. Turu, N.V. Kachur, “Application of temperature sensors for improving the device based on the phenomenon of surface plasmon”, *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, Odessa, 2016, pp. 33–40.

14. Maslov V.P., Kachur N.V., Dorozinsky G.V. Investigation of Sensors Based on ITO Nanofilms in SPR-Devices. *American Journal of Optics and Photonics*, Vol. 4, № 3 (2016) 20–24.

15. Аззам Р.Эллипсометрия и поляризованный свет. / Р. Аззам, Н. Башара. М. : Мир, 1981. 583 с.

16. Chegel V. I., Shirshov Yu. M., Kostyukevich S. O., [et al.] Experimental investigations and computer modelling of the photochemical processes in Ag-As₂S₃ structure using surface plasmon resonance spectroscopy. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2001. 4, No 4. P. 301–306.

REFERENCES:

1. Homola, J., Yee, S. and Gauglitz, G. Surface plasmon resonance sensors: review, *Sensors and Actuators B* 54, (1999). 3–15.

2. Yu.M. Shirshov, A.V. Samoylov, S.A. Zinyo, E.R. Surovceva, V.Mirskiy, “Bimetallic layers increase sensitivity of affinity sensors based on surface plasmon resonance”, *Sensors*, 2002, p. 62–70.

3. Nan-Fu Chiu, Yi-Chen Tu, Teng-Yi Huang, “Enhanced Sensitivity of Anti-Symmetrically Structured Surface Plasmon Resonance Sensors with Zinc Oxide Intermediate Layers”, *Sensors*, 2014, p. 170–187.

4. D. A. Grynko, A. N. Fedoryak, P. S. Smertenko, O. P. Dimitriev, N. A. Ogurtsov and A. A. Pud, “Hybrid solar cell on a carbon fiber”, *Nanoscale Research Letters*, Springer, 2016, pp. 265–273.

5. Innem V. A. K. Reddy, Josep M. Jornet, Alexander Baev, and Paras N. Prasad, "Extreme local field enhancement by hybrid epsilon-near-zero-plasmon mode in thin films of transparent conductive oxides," *Opt. Lett.* 45, 5744–5747 (2020).

6. K. Grytsenko, Yu. Kolomzarov, P. Lytvyn, [et al.]. Effect of magnetic field on film formation by means of polytetrafluoroethylene decomposition in vacuum, *MATERIALS, TECHNOLOGIES, TOOLS – 2011*, 16, No 4, p. 56–59.

7. Hastings J. T., Guo J., Keathley P. D., Kumares P. B., Wei Y., Law S., and Bachas L. G. Optimal self-referenced sensing using long- and short- range surface plasmons. *Optics express*. 2007. 15, No 26. P. 17661–17672.

8. Masaru Mitsushio, Akimichi Nagaura, Toshifumi Yoshidome, Morihide Higo. Molecular selectivity development of Teflon® AF1600-coated gold-deposited surface plasmon resonance-based glass rod sensor. *Progress in Organic Coatings*. 2015. 79. P. 62–67.

9. Dorozinska H.V., Dorozinsky G.V., Maslov V.P., Grycenko K.P., Kolomzarov Yu.V., Lytvyn P.M., Doroshenko T.P. Features of application of the additional nano layer of polytetrafluoroethylene in sensors based on surface plasmon resonance phenomenon? *Optoelectron. Semicond. Tech.* 54, 88–95 (2019) [in Ukrainian]

10. S. K. Ozdemir, G. Turhan-Sayan, “Temperature Effects on Surface Plasmon Resonance: Design Considerations for an Optical Temperature Sensor”, *Journal of light wave technology*, 2003, p. 805–815.

11. Anuj K. Sharma and Banshi D. Gupta, "Influence of temperature on the sensitivity and signal-to-noise ratio of a fiber-optic surface-plasmon resonance sensor," *Appl. Opt.* 45, 151–161 (2006).

12. G. Dorozinsky, V. Maslov, A. Samoylov, Yu. Ushenin, “Reducing measurement uncertainty of instruments based on the phenomenon of surface plasmon resonance”, *American Journal of Optics and Photonics*, 2013, p. 17–22.

13. Yu.V. Ushenin, V.P. Maslov, T.A. Turu, N.V. Kachur, “Application of temperature sensors for improving the device based on the phenomenon of surface plasmon”, *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, Odessa, 2016, pp. 33–40.

14. Maslov V.P., Kachur N.V., Dorozinsky G.V. Investigation of Sensors Based on ITO Nanofilms in SPR-Devices. // American Journal of Optics and Photonics, Vol. 4, № 3 (2016). 20–24.
 15. Azzam R. Ellipsometriya i polarizovannyj svet. / R. Azzam, N. Bashara. M.: Mir, 1981. 583 p. [in Russian]
 16. Chegel V. I., Shirshov Yu. M., Kostyukevich S. O., [et al.] Experimental investigations and computer modelling of the photochemical processes in Ag-As₂S₃ structure susing surface plasmon resonance spectroscopy. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2001. 4, No 4. P. 301–306.
-