

УДК 535.233

## КОНСТРУЮВАННЯ І ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ БАГАТОШАРОВИХ ПОВЕРХНЕВО-БАР'ЄРНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ ДИФРАКЦІЙНИХ ҐРАТОК ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

*М. В. Соснова, М. Л. Дмитрук, О. В. Коровін,  
О. І. Маєва, С. В. Мамикін, В. Р. Романюк*

Інститут фізики напівпровідників НАНУ, просп. Науки, 45, 03028, Київ, Україна  
Тел: +(380 44) 525 65 46. Факс: +(380 44) 525 83 42  
E-mail: sosnova@isp.kiev.ua

### Анотація

#### КОНСТРУЮВАННЯ І ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ БАГАТОШАРОВИХ ПОВЕРХНЕВО-БАР'ЄРНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВІ ДИФРАКЦІЙНИХ ҐРАТОК ДЛЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

*М. В. Соснова, М. Л. Дмитрук, О. В. Коровін, О. І. Маєва, С. В. Мамикін, В. Р. Романюк*

В роботі теоретично та експериментально розглянуто вплив додаткових хвилеводних та покриваючих шарів на чутливість оптоелектронних сенсорів, дія яких базується на явищі поверхневого плазмонного резонансу (ППР). Теоретичні розрахунки базуються на диференціальному формалізмі, в рамках якого були розраховані коефіцієнти пропускання та відбивання багатошарових структур з синусоїдальними періодичними рельєфами. Отримані експериментальні спектральні та кутові залежності коефіцієнтів відбивання узгоджуються з теоретичними розрахунками, що дає можливість створювати сенсорні структури з наперед заданими властивостями.

**Ключові слова:** оптохімічні сенсори, поляритонні фотодетектори, поверхневий плазмонний резонанс, хвилеводні моди.

### Abstract

#### DESIGN AND CHARACTERIZATION OF SURFACE BARRIER HETEROSTRUCTURES BASED ON MULTILAYER DIFFRACTION GRATING FOR OPTOELECTRONIC DEVICES

*M. V. Sosnova, M. L. Dmitruk, A. V. Korovin, O. I. Mayeva, S. V. Mamikin, V. R. Romanyuk*

In this work the influence of both additional waveguide and covering layers on the sensitivity of the optoelectronic sensors based on surface plasmon resonance was studied theoretically and experimentally. Theoretical investigations of the optical properties of multilayered structures with sinusoidal periodical relief were carried out in the framework of differential formalism. The agreement between experimental spectral and angular characteristics of reflection and theoretical ones is quite well. It allows designing sensors with the predictable properties.

**Key words:** optochemical sensor, polaritonic photodetector, surface plasmon resonance, waveguide mode.

## Аннотация

### КОНСТРУИРОВАНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

*М. В. Соснова, Н. Л. Дмитрук, А. В. Коровин, О. И. Маева, С. В. Мамыкин, В. Р. Романюк*

В статье теоретически и экспериментально рассмотрено влияние дополнительных волноводных и покрывающих слоев на чувствительность оптоэлектронных сенсоров, работа которых основана на явлении поверхностного плазмонного резонанса. Теоретические расчеты базируются на дифференциальном формализме, в рамках которого были получены значения коэффициентов пропускания и отражения для многослойных структур с синусоидальным периодическим рельефом. Угловые и спектральные характеристики коэффициента отражения, полученные экспериментально, совпадают с теоретическими расчетами, что дает возможность создавать сенсорные структуры с заданными свойствами.

**Ключевые слова:** оптохимический сенсор, поляритонный фотодетектор, поверхностный плазмонный резонанс, волноводные моды.

## 1. Вступ

Головною особливістю досліджуваних приладів (оптохімічних сенсорів/поляритонних фотодетекторів (ОХС/ПФД)) є підвищена чутливість, що досягається за рахунок підсилення електромагнітного поля на межі поділу поверхнево-бар'єрних гетероструктур (ПБГ) з оточуючим середовищем внаслідок збудження поверхневих та/або хвильоводних мод. З метою підвищення чутливості ОХС/ПФД та модифікації характеристик ППР, було використано багат шарові ПБГ на основі дифракційних ґраток (ДГ) на поверхні GaAs, отриманих методом голографічної літографії, з біметалевими (Ag/Au), прозорими діелектричними ( $\text{SiO}_x$ ) або провідними (ІТО) покриттями.

Використання діелектричних шарів ( $\text{SiO}_x$ ,  $x \leq 2$ ) стимулювалося тим фактором, що резонансні хвильоводні моди поширюються в них з меншими втратами, тому що електромагнітне поле концентрується всередині діелектричного шару, який має дуже слабе поглинання в актуальному діапазоні довжин хвиль.

Плівки ІТО обрано через їх унікальні властивості — оптичне пропускання сумісне з високою електричною провідністю, які знаходять широке використання в оптоелектроніці та фотоніці.

При конструюванні та використанні пристроїв оптоелектронної техніки і, особливо, нанофотоніки на основі тонкоплівкових багат шарових систем важливо знати оптичні

константи усіх шарів, що використовуються. Добре відомо, що фізичні властивості напилюваних шарів для більшості стандартних процесів напилення залежать від параметрів процесу напилення. А із багаточисленних експериментів на тонких плівках впливає значна залежність оптичних властивостей напилюваних шарів (коефіцієнт відбивання/розсіювання світла, ефективність збудження поверхневих поляритонів (ПП)) від типу та стану підкладки. Таким чином, оптичні властивості кожної складової багат шарових структур залежать від контактних середовищ.

Стаття присвячена характеристиці багат шарових ДГ як елементів ОХС/ПФД методом спектральної еліпсометрії та спектрофотометрії відбивання/пропускання. В ході дослідження були застосовані модельні наближення для дисперсії оптичних констант досліджуваних складових шарів ПБГ, від яких залежить фотовідгук системи. Особливу увагу було приділено теоретичному аналізу кутових та спектральних характеристик відбивання/пропускання світла багат шаровими хвильоводними структурами (використовуючи метод диференціального формалізму [1]) в залежності від товщини та оптичних характеристик складових шарів. Результати такого аналізу на послідовних технологічних стадіях отримання ПБГ були враховані з метою оптимізації характеристик фотоелектричних та сенсорних елементів та наступного конструювання приладу на їх основі.

## 2. Зразки та методи

Дифракційні ґратки на поверхні GaAs (100) були отримані методом голографічної фотолітографії [2]. На їх основі багатошарові структури виготовлялись шляхом поетапного термічного осадження тонких металевих (Au, Ag) та діелектричних ( $\text{SiO}_x$ ) плівок, а також способом магнетронного розпилення плівок ІТО на текстуровані (ДГ) поверхні (GaAs) і на плоскі зразки-супутники при кімнатній температурі в одній стадії напilenня. Шари ІТО для збільшення електричної провідності відпалювались при  $350^\circ\text{C}$  30 хв. у вакуумі.

Всі вимірювання оптичних констант плівок проведено на спектральному еліпсометрі (VASE® Research Spectroscopic Ellipsometer, J.A. Woollam Company) в області енергій фотонів  $1.24 \div 5$  eV при трьох кутах падіння. Вимірювання відбивання/пропускання структур здійснено на автоматизованій установці на базі спектрометра ИКС-12. Додаткова інформація про варіації морфології поверхні досліджуваних ДГ була отримана за допомогою атомної силової мікроскопії (NanoScope™ III A controller and Dimension™ 5000, Digital Instruments, USA). Результати вимірювань шорсткості і типу профілів канавок (секційний аналіз) було співставлено з особливостями спектрів відбивання/пропускання світла ПБГ.

### 2.1. Оптичні властивості діелектричних плівок $\text{SiO}_x$

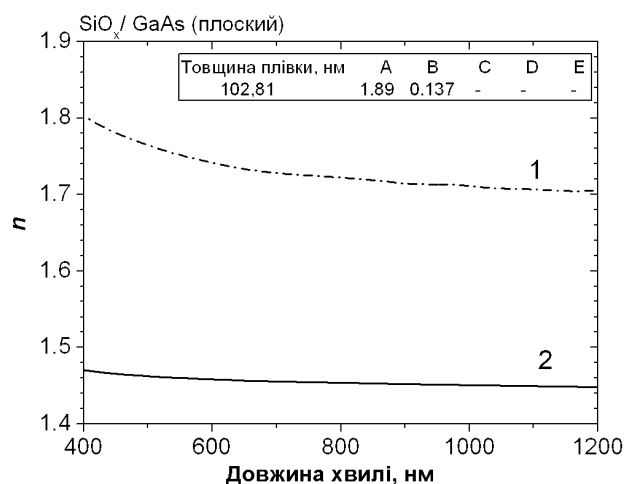
Плівки  $\text{SiO}_x$  виготовлені способом термічного випаровування монооксиду кремнію (SiO) при кімнатній температурі на два типи підкладок: плоскі зразки GaAs та скляні підкладки-супутники. Оптичні властивості діелектричних плівок  $\text{SiO}_x$  визначалися методом підгонки розрахованих еліпсометричних кутів  $\Psi$  і  $\Delta$  до їх експериментальних значень з використанням оптичних констант, що описуються співвідношенням Селмайера [3]:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{A}{1 - \left(\frac{B}{\lambda}\right)^2};$$

$$k(\lambda) = \frac{1}{n(\lambda)} \cdot \frac{C}{D\lambda + \frac{E}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^3}}, \quad (1)$$

де А, В, С, D та Е — параметри підгонки,  $\lambda$  — довжина хвилі.

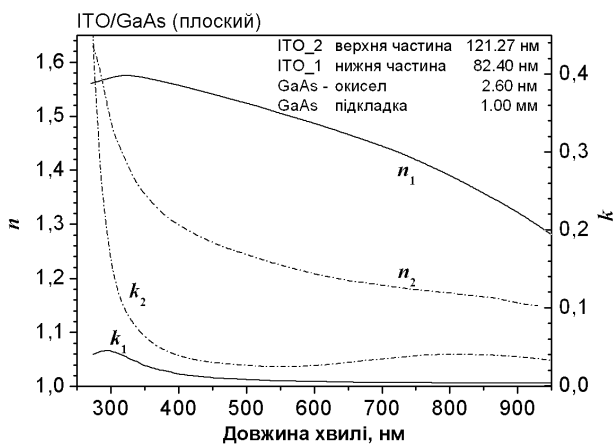
Спектр коефіцієнта заломлення  $n$  з відповідними параметрами моделі Селмайера наведено на Рис.1. Як видно з рисунку, значення  $n$  досліджуваних плівок вище за значення коефіцієнта заломлення для об'ємного  $\text{SiO}_2$ . Таке підвищення можна пояснити збагаченням окислу кремнієм, тобто додатковим утворенням Si-Si зв'язків.



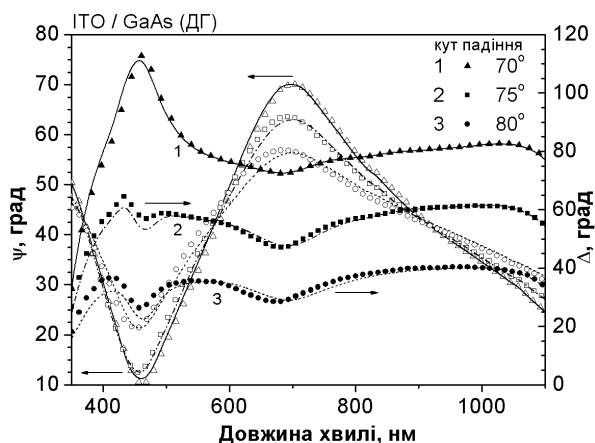
**Рис.1.** Спектральна залежність показника заломлення плівки  $\text{SiO}_x$ , отримана шляхом підгонки еліпсометричних даних в моделі Селмайера: крива 1 (параметри підгонки представлені в вставці); крива 2 — табличні дані [4].

### 2.2. Оптичні властивості провідних плівок ІТО

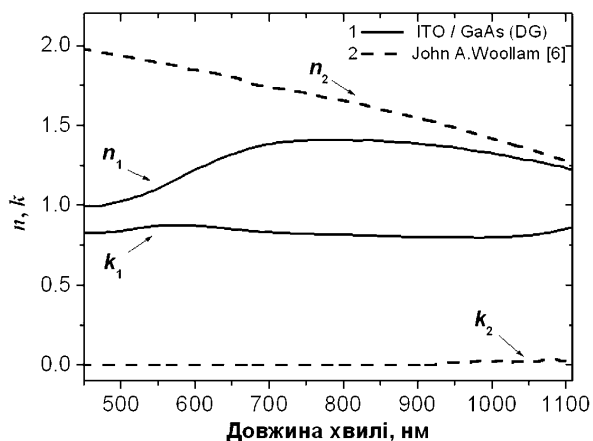
Для отримання дійсних оптичних констант плівок ІТО проведено аналіз спектрів еліпсометричних кутів  $\Psi$ ,  $\Delta$  для зразків ІТО на склі та плоских підкладках GaAs (Рис. 2, 3). В процесі підгонки було застосовано дві моделі: (1) дисперсійна модель осциляторів Лоренца, при цьому плівка була поділена на два підшари з відмінними оптичними константами (Рис. 2); з рисунка видно, що для плоскої двошарової структури коефіцієнт поглинання  $k$  плівки ІТО менший у глибині плівки, тобто плівка має більшу провідність біля поверхні; дослідження [6] свідчать також, що після відпалу у вакуумі провідність ІТО покращується за рахунок збільшення концентрації вакансій кисню; (2) модель однорідного ефективного середовища, коли підгонка здійснюється поточно, що забезпечує визначення товщини та ефективних коефіцієнтів заломлення та поглинання плівки, напленої на рельєфну поверхню GaAs (ДГ) (Рис. 3).



**Рис.2.** Оптичні константи  $n$  та  $k$  для плівки ІТО, отримані із аналізу еліпсометричних даних. На вставці показана модель плівки: ІТО\_2 (верхній шар) та ІТО\_1 (нижній шар).



**Рис.3.** Експериментальні спектри точок еліпсометричних кутів  $\Psi$  і  $\Delta$  (у випадку коли напрям вектора  $E$  паралельний штрихам ґратки, випадок  $s$ -поляризації падаючого променя[5]) та розраховані спектри (суцільні криві) для зразка ІТО/GaAs (ДГ).



**Рис.4.** Оптичні константи  $n$  та  $k$  ІТО, отримані методом спектральної еліпсометрії.

Результати еліпсометричного аналізу наведені на Рис. 4 разом із табличними даними [6]. В ході аналізу було зроблене припущення, що досить товстий шар ІТО (160 нм) є квазіоднорідним у об'ємі з тонкою областю поблизу інтерфейсу, що виникає внаслідок інтердифузії і хімічних реакцій. Таке припущення корелює з поведінкою  $n$  і  $k$  в залежності від довжини хвилі. Враховуючи, що технологічні умови розпилення ІТО (потужність магнетрона і швидкість осадження) підтримувались постійними для плоских і рельєфних підкладок, ми дійшли до висновку, що зміни оптичних констант ІТО у видимій області спектру залежать як від контактуючих середовищ (підкладок), так і морфологічних особливостей підкладки.

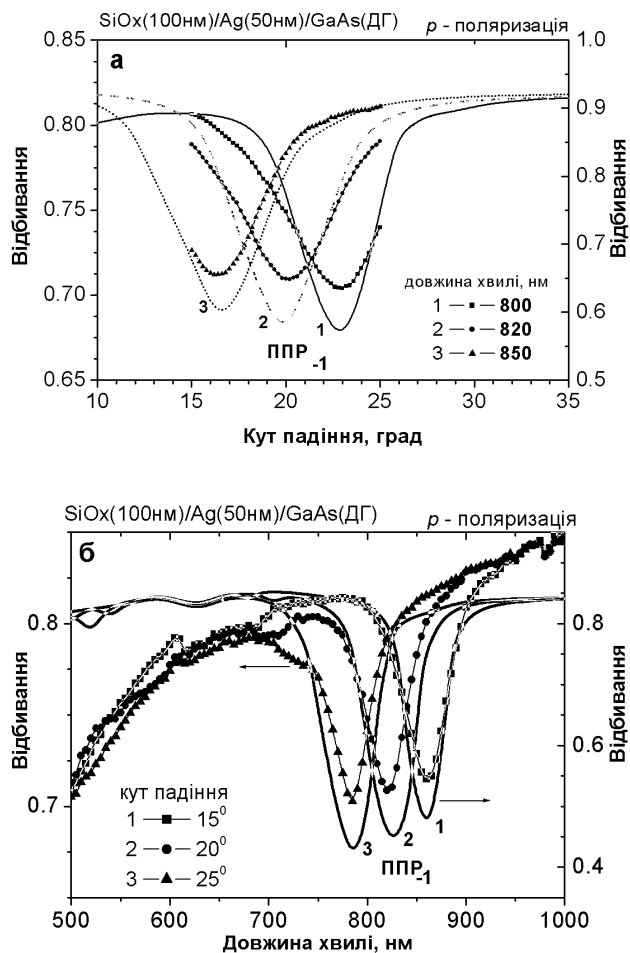
### 3. Моделювання оптичних характеристик багатшарових ПБГ структур і модифікація їх резонансних властивостей

Аналіз оптичних (кутових та спектральних) характеристик відбивання/пропускання світла багатшаровими структурами як елементів оптихімічного сенсора (поляритонного фотодетектора) було проведено в рамках методу диференціального формалізму [1]. А саме: шляхом введення неортогональної системи координат, в якій граничні умови для багатшарової структури з однаковими періодичними профілями інтерфейсів перетворюються на плоскі граничні умови та значення електромагнітних полів шукаються у вигляді суперпозиції плоских хвиль з урахуванням періодичності профілів (розклад в ряд Фур'є по періоду профілю).

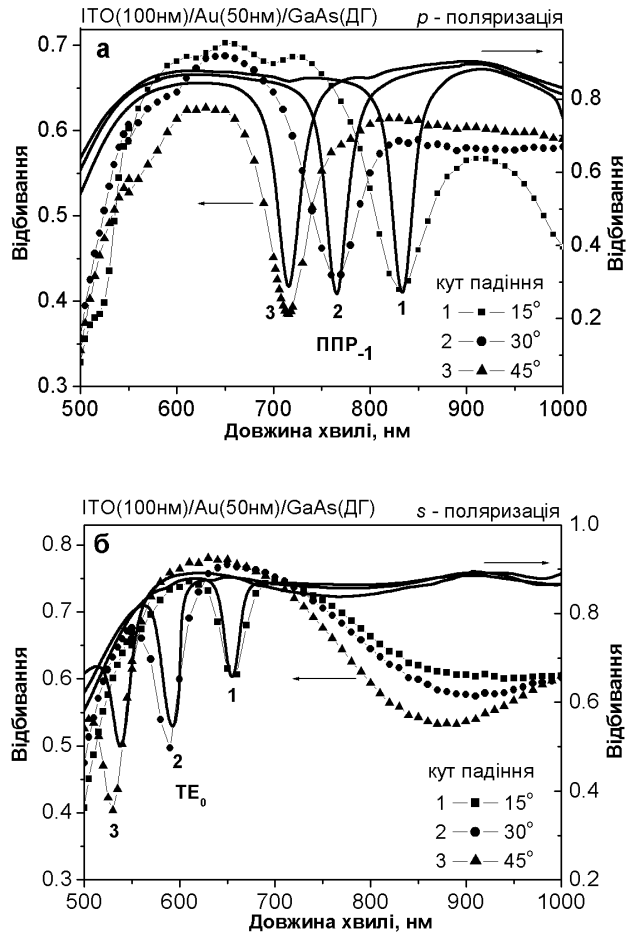
В модельних розрахунках використано експериментально визначені значення оптичних констант  $n$  і  $k$  для шарів ІТО та  $\text{SiO}_x$  (Рис. 1-4). Представлені на Рис. 5-7 результати розрахунків відбивання ( $R_p$ ,  $R_s$ ) та диференціального пропускання ( $T_p - T_{p0}$ ) багатшарових ДГ демонструють резонансні властивості по відношенню до кута падіння та довжини хвилі.

В роботі представлені переваги використання багатшарових сенсорних структур. Так, при введенні в систему додаткового прозорого хвилеводного шару (ІТО або  $\text{SiO}_x$ ) певної товщини, що визначається періодом структури, типом контактних матеріалів, створюються умови для збудження хвилеводних мод ТЕ і ТМ типів. Поширення такого типу власних електромагнітних мод дозволяє суттєво збільшити довжину

пробігу хвилі у хвилеводному шарі порівняно з довжиною пробігу поверхневих плазмонних поляритонів на межі поділу ІТО/Au, адже електричні поля хвилеводних мод зосереджені головним чином в слабо поглинаючому шарі діелектрика. Тому наявність в структурі хвилеводних шарів підвищує чутливість елемента. Порівняння оптичних характеристик модельних структур ІТО/Au/GaAs та  $\text{SiO}_x/\text{Ag}/\text{GaAs}$  (Рис. 5, 6) демонструє переваги використання в якості хвилевода плівки ІТО. Адже, як видно зі спектрів відбивання, збудження хвилеводних мод в плівках ІТО можливе при менших товщинах, а крім того, плівки даного типу дозволяють працювати системі в режимі фотодетектора, коли на межі поділу провідник/GaAs існує потенціальний бар'єр.



**Рис.5.** Кутові (а) та спектральні (б) залежності відбивання від багатшарової структури  $\text{SiO}_x(100 \text{ нм})/\text{Ag}(60 \text{ нм})/\text{GaAs}$  (ДГ)  $p$ -поляризованого променя (експериментальні криві — точки, розрахункові — суцільні криві). Параметри ґратки: період  $d = 850 \text{ нм}$  і глибина  $h = 45 \text{ нм}$ . Провал в спектрі відбивання відповідає збудженню ППР моди (-1) порядку на межі поділу  $\text{SiO}_x/\text{Ag}$ .



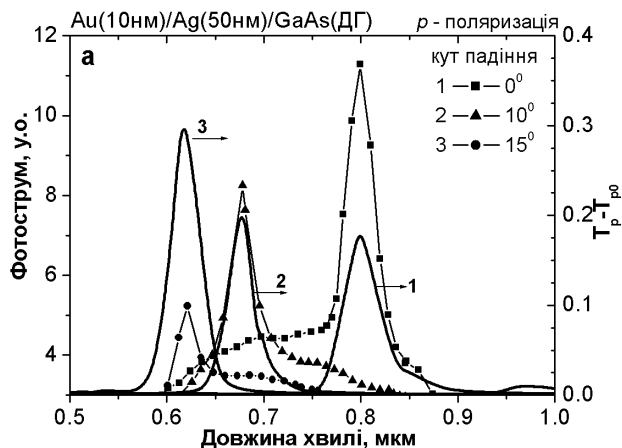
**Рис.6.** Спектральні залежності відбивання від багатшарової структури  $\text{ІТО}(100 \text{ нм})/\text{Au}(50 \text{ нм})/\text{GaAs}$  (ДГ) променя  $p$ - (а) та  $s$ - (б) поляризації (експериментальні криві — точки, розрахункові — суцільні криві). Параметри ґратки: період  $d = 750 \text{ нм}$  і глибина  $h = 45 \text{ нм}$ . Провал в спектрі відбивання відповідає збудженню (а) ППР моди (-1) порядку на межі поділу  $\text{ІТО}/\text{Ag}$ ; (б) хвилеводної  $\text{TE}_0$  моди в шарі  $\text{ІТО}$ .

Використання подвійного покриття ( $\text{Ag}$  (50 нм) — плазмон-несуча плівка та  $\text{Au}$  (10 нм) — тонка захисна покриваюча плівка) (Рис. 7) дозволяє підвищити хімічну стабільність бар'єрного контакту ПБГ, а також забезпечити кращі умови збудження ППР, оскільки срібло дає більш вузьку резонансну криву, а золото забезпечує хімічну стабільність структури.

**Висновки**

Таким чином, аналіз теоретичних та експериментальних результатів, зроблений на кожній послідовній технологічній стадії конструювання селективно-чутливих елементів оптохімічних сенсорів та поляритонних фотодетекторів дозволяє виявити тенденції поведінки власних електромагнітних мод системи (поверхневих

плазмонних поляритонів, хвильоводних мод) в багатошарових структурах з синусоїдальним профілем поверхні. Даний процес дозволяє вибрати оптимальні параметри допоміжних захисних та хвильоводних шарів, параметри ґратки та плазмон-несучого шару, що є необхідним для настройки сенсорного елемента в широкому спектральному діапазоні та підвищення чутливості резонансних характеристик плазмонного резонансу.



**Рис. 7.** Спектральні криві фотоструму диференціального підсилення пропускання ( $T_p - T_{p0}$ ) структури Au(10)/Ag(50)/GaAs(ДГ) з періодом  $d = 850$  нм і глибиною  $h = 45$  нм (експериментальні криві — точки, розрахункові — суцільні криві). Максимум фотоструму відповідає збудженню ППР моди (-1) порядку на межі поділу повітря/Ag.

## Література

1. R. Petit, (Ed) Electromagnetic Theory of Gratings. Springer-Verlag, Berlin (1980).
2. Indutnyy I.Z., Romanenko P.F., Stronski A.V., Kostioukevitch S.A., Shepeliavii P.E., Min'ko V.I., Chalcogenide inorganic resists as holographic recording media // Proc. SPIE. — 1998 — №3486, P. 82-87.
3. Dobrowolski J.A., Ho F.C., Woldorf A., Determination of optical constants of thin film coating materials based on inverse synthesis // Appl.Opt. — 1983 — №22, P. 31-3200.
4. Palik E.D, (Ed.) Handbook of Optical Constants of Solids. — Academic Press, Orlando (Fl.), 1985.
5. Dmitruk N.L., Klopfleisch M., Mayeva O.I., Mamykin S.V., Venger E.F. and Yastrubchak O.B., Multilayer diffraction gratings Al/GaAs as polaritonic photodetectors // Phys.Stat.Sol.(a) — 2001 — №184 P. 165-174.
6. Woollam J.A., McGahan W.A., and Johs B., Spectroscopic ellipsometry studies of indium tin oxide and other flat panel display multilayer materials // Thin Solid Films. — 1994 — №241, P. 44-46.