

УДК 577.2.08

## **Датчик на основі поверхневих плазмонних хвиль**

*Бойко Ю.О., к.т.н., доц. Чадюк В.О.*

### **Вступ**

Датчики, в яких використовують явище поверхневого плазмонного резонансу, є різновидом тонкоплівкових рефрактометрів. Датчики вимірюють зміни показника заломлення середовища, яке примикає до поверхні металевої плівки. Такі датчики зазвичай будують за схемою Кречмана, в якій тонка металева плівка нанесена на поверхню повного внутрішнього відбиття скляної призми. Схема Отто, в якій призма знаходиться на субмікронній відстані від поверхні металу, менш поширена, але вона дозволяє збуджувати поверхневий плазмонний резонанс за допомогою ближнього поля дифракції випромінювання на субмікронній апертурі, наприклад, загостреного оптичного волокна, що може стати окремим перспективним напрямком побудови плазмонних наносенсорів.

### **Принцип дії та конструкція плазмонного датчика**

Поверхневі плазмони – це колективні коливання електронів під поверхнею освітленого об'ємного металу, а у разі використання металевої плівки – у всій товщі плівки. За достатньої різниці у показниках заломлення діелектриків по обидва боки металевої плівки можлива поява

з боку меншого показника заломлення плазмонних поляритонів – квантів коливання електромагнітного поля, нерозривно пов'язаних з квантами коливання електричного заряду.

Поляритони утворюють над поверхнею плівки еванесцентне електричне поле, яке згасає на відстані менше 1 мкм від поверхні плівки. Це поле використовують для вимірювання параметрів діелектричного середовища, яке безпосередньо прилягає до металевої плівки. Зміна показника заломлення діелектрика впливає на умови збудження поверхневих плазмонних хвиль, а відповідно і поляритонних хвиль, змінюючи параметри відбитої хвилі, зокрема інтенсивність та фазу.

У даній роботі проаналізовано датчик на основі поверхневих плазмонних хвиль, принцип дії якого полягає у вимірюванні інтенсивності монохроматичного світла, відбитого від металевої плівки.

У разі використання схеми Кречмана для побудови датчика маємо тришарову структуру типу діелектрик-метал-діелектрик, а точніше – скло-метал-повітря (рис. 1). Для збудження поверхневих плазмонних хвиль у металі і зв'язаних з ними поляритонних хвиль у повітрі

потрібно виконати умову фазового синхронізму світлової та плазмонної хвиль [1]. Якщо  $\mathbf{k}_0$  – це хвильовий вектор світлової хвилі у повітрі, то у призмі він стає рівним  $\mathbf{k}_0\sqrt{\varepsilon_{gl}}$ , де  $\varepsilon_{gl}$  – діелектрична проникність скла призми. За кута падіння  $\theta$  випромінювання на металеву плівку компонента хвильового вектора вздовж межі скло-метал дорівнює  $k_0\sqrt{\varepsilon_{gl}}\sin\theta$ , де  $k_0$  – хвильове число,  $k_0 = \omega/c$ ,  $\omega$  – частота випромінювання. За рахунок того, що діелектрична проникність скла більша за проникність повітря ( $\varepsilon_{gl} > \varepsilon_{air}$ ,  $\varepsilon_{air} = 1$ ), стає можливим зрівняти швидкості плазмонної та поляритонної хвиль, тобто досягти, щоб стала поширення поляритонної хвилі  $\beta = k_0\sqrt{\varepsilon_{gl}}\sin\theta$ . Це і є умова фазового синхронізму, без виконання якої поляритонна хвиля не виникає.

У металу діелектрична функція є комплексною, тобто  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{Re}(\omega) + i\varepsilon_{Im}(\omega)$ , причому її дійсну та уявну частини можна виразити через показник заломлення металу  $n$  та його коефіцієнт екстинкції  $\kappa$  як  $\varepsilon_{Re} = n^2 - \kappa^2$  та  $\varepsilon_{Im} = 2n\kappa$ . У свою чергу коефіцієнт екстинкції зв'язаний з коефіцієнтом поглинання  $\alpha$  (присутнім в законі експоненціального ослаблення випромінювання Бугера-Ламберта-Бера) співвідношенням  $\kappa = c\alpha/2\omega$ .

Внаслідок того, що реальний метал не є ідеальним провідником (уявна частина його діелектричної функції  $\varepsilon_{Im} \neq 0$ ), довжина пробігу поляритонів  $L_{spp}$  на поверхні металу досить обмежена – для видимого випромінювання від 10 до 100 мкм залежно від параметрів металу та діелектрика [2]. Фактично цією довжиною обмежується розмір (принаймні в одному напрямку) чутливої поверхні датчика. Якщо поблизу чутливої поверхні датчика відбудеться локальна зміна діелектричної проникності середовища, наприклад, за рахунок потрапляння у зону чутливості наночастинки, зміняться інтенсивність та фаза відбитого випромінювання і умова фазового синхронізму спостерігатиметься за трохи іншого кута.

Спрощена схема плазмонного датчика зображена на рис. 1. Промінь поляризованого лазерного випромінювання через призму спрямовується на тонку золоту плівку, нанесену на грань повного внутрішнього відбиття призми. Зміною кута падіння світла досягають виконання умови фазового синхронізму. У разі виконання цієї умови спостерігається мінімум інтенсивності відбитого світла: збуджені поверхневі плаزمони відбирають частину енергії у падаючої світлової хвилі, що є причиною появи мінімуму на кривій інтенсивності відбитого світла.

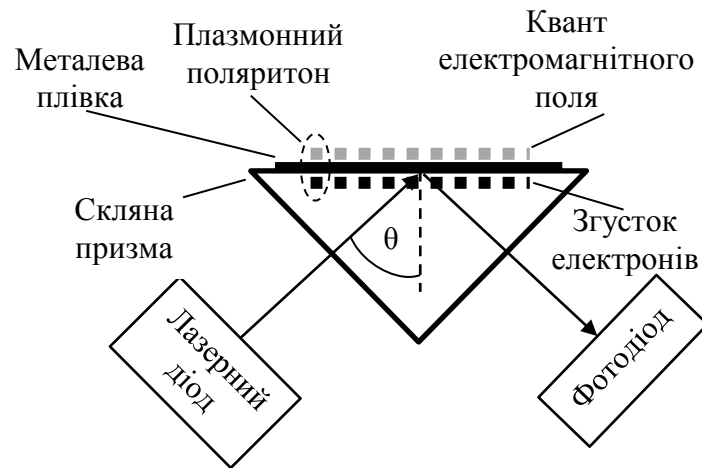


Рис. 1. Схема плазмонного датчика, побудованого за схемою Кречмана

Якщо діелектрична функція металу задовольняє умовам  $\epsilon_{Re} \gg 1$  та  $\epsilon_{Im} \ll \epsilon_{Re}$ , то коефіцієнт відбиття металеві плівки може бути розрахований за формулою [2]

$$R = 1 - \frac{4\gamma_{abs}\gamma_{LR}}{[\beta - (\beta_0 + \Delta\beta)]^2 + (\gamma_{LK} + \gamma_{abs})^2}$$

де  $\beta_0$  – стала поширення плазмонної хвилі для двошарової структури метал-діелектрик,  $\beta_0 = k_0 \sqrt{\epsilon \epsilon_{gl} / (\epsilon + \epsilon_{gl})}$ ;  $\Delta\beta$  – приріст сталої поширення за переходу від дво- до тришарової структури, який можна розрахувати для заданої товщини металеві плівки за формулами Френеля [3];  $\gamma_{abs}$  – коефіцієнт згасання випромінювання внаслідок поглинання,  $\gamma_{abs} = \text{Im}(\beta_0)$ ;  $\gamma_{LR}$  – коефіцієнт згасання випромінювання внаслідок витоку,  $\gamma_{LK}$  – внесок згасання випромінювання у повні оптичні втрати,  $\gamma_{LK} = \text{Im}(\Delta\beta)$ .

Розрахунок показує, що найкращим значенням товщини золотої плівки є 50 нм, так як при

такій товщині забезпечується ефективно спостереження явища плазмонного резонансу.

Золото та срібло є традиційними металами у плазмонних пристроях, але у нанорозмірних шарах металу важко забезпечити однорідність плівки. Останнім часом дослідники звернули увагу на оксид індію-олова (ITO), поширений матеріал для прозорих електродів. Оптимальним значенням товщини плівки для спостереження у цьому матеріалі плазмонних поляритонів є 160 нм [4].

На рис. 2 зображена структурна схема стенду для дослідження плазмонного датчика. У конструкції датчика передбачено використання лазерного діода з довжиною хвилі 650 нм та потужністю 50 мВт. Модуляція інтенсивності випромінювання лазерного діода з частотою 1 МГц здійснюється за допомогою високочастотного генератора, сигнал якого керує струмом драйвера лазерного діода. Коліматор формує паралельний пучок, який спрямовується на призму. Контроль за поляризацією

випромінювання здійснюється за допомогою поляризатора.

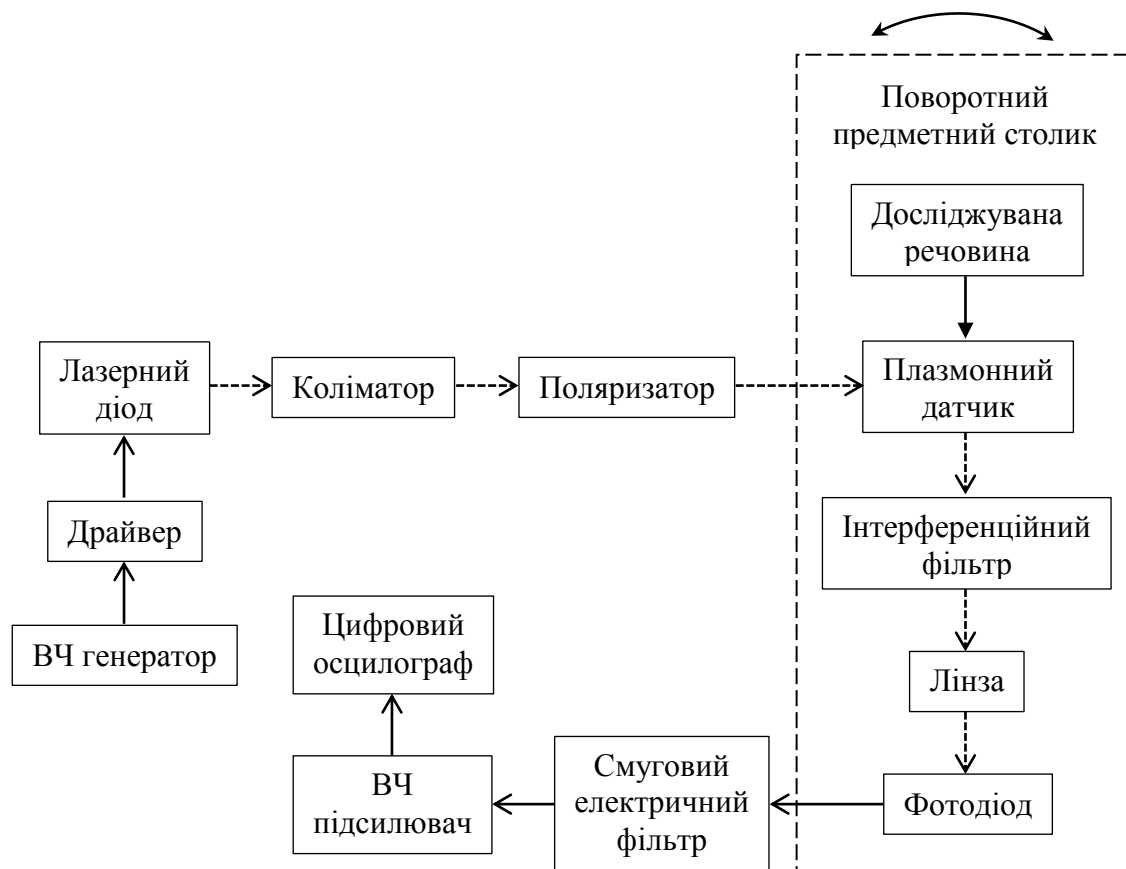


Рис. 2. Структурна схема стану для дослідження плазмонного датчика

Плазмонний датчик (призма з металевою плівкою) знаходиться на поворотному предметному столику, де розташовано також інтерференційний фільтр (для зменшення фонового засвічування), фотодіод з малою фоточутливою поверхнею (для зменшення шумів) та фокусувальна лінза.

Фотоелектричний сигнал проходить крізь вузькосмуговий фільтр, який видаляє з сигналу низькочастотні флікер- та вібраційний шуми, зменшує тепловий шум та подається на цифровий осцилограф. Осцилограф дозволяє швидко порівнювати осцилограми, зняті за

різних умов, та обробляти результати експериментів.

### Висновки

Метою даної роботи є аналіз принципів побудови датчика на основі поверхневих плазмонних хвиль та розробка стану для дослідження плазмонного сенсора.

Плазмонний датчик призначений для вимірювання локальних змін діелектричної проникності середовища, яке безпосередньо прилягає до металевої плівки, нанесеної на поверхню скляної призми. За допомогою датчика можна відслідковувати також перебіг різних процесів в діелектричних

середовищах, зокрема біохімічних процесів у водному середовищі.

Ураховуючи те, що досліджувана речовина має знаходитись в зоні дії еванесцентного поля (приблизно  $100 \times 100 \times 1$  мкм<sup>3</sup>), можливі різні варіанти взаємодії предмету дослідження з полем, використовуючи, наприклад:

- розміщення досліджуваних наночастинок у рідині, нанесеній на поверхню металевої плівки призми, і їх переміщення за допомогою лазерного пінцета;
- використання скляної підкладки, поверхня якої паралельна поверхні металізованої грані призми і підводиться до неї на відстань приблизно 1 мкм, з розташованій на ній нанорозмірними предметами дослідження у вигляді плівки або наноб'єктів, притиснутих

до підкладки електро- або магнітостатичними силами.

### Література

1. Климов В. В. Наноплазмоника / В. В. Климов. – М.: Физматлит, 2009. – 480 с.
2. Maier S. Plasmonics: fundamentals and applications / S. Maier. – New York : Springer, 2007. – 223 p.
3. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф, изд 2-е. – М.: Наука, 1973. – С. 583.
4. Rhodes C. Dependence of plasmon polaritons on the thickness of indium tin oxide thin films / C. Rhodes, M. Cerruti, A. Efremenko et al. // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 108, issue 9. – P. 093108-1–093108-6.