

При використанні значення опорного живлення V_{REF} 2,5 В відносно землі, вихідну напругу трансімпедансного підсилювача можна записати як:

$$V_0 = 2,5B + I_{WE} \times RF ,$$

де: I_{WE} – струм, що надходить у електрод WE; RF – резистор трансімпедансного підсилювача.

Якщо, наприклад, максимальна чутливість сенсору 60 nA/ppm, а максимальний діапазон вимірювання становить 3000 ppm, то максимальна вихідна напруга при струмі 180 мкА визначається значенням резистору трансімпедансного підсилювача.

$$V_0 = 2,5B + 3000 ppm \times 60 nA / ppm \times RF = 2,5B + 180 мкА \times RF .$$

Ключові слова: мембранний потенціал, газовий сенсор, електрохімічний сенсор.

Література

- [1] В. П. Чвірук, С. Г. Поляков та Ю. С. Герасименко, “Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ”, *Монографія*. Київ: Академперіодика, 2007.
- [2] U. Yogeswaran and S. Chen, “A Review on the Electrochemical Sensors and Biosensors. Composed of Nanowires as Sensing Material”, *Sensors*, № 8, pp. 290 - 313, 2008.
- [3] Low Noise, Single-Supply, Toxic Gas Detector, Using an Electrochemical Sensor with Programmable Gain TIA for Rapid Prototyping. [Online]. Available: www.mouser.com/datasheet/2/609/CN0357-372576.pdf. Accessed on: February 10, 2022 p.

УДК 534 +531.7+53.082.

МЕТОД МУЛЬТИХВИЛЬОВОЇ ГЕТЕРОДИННОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ НАНОРОЗМІРНИХ ШАРІВ У ПРОЦЕСІ ЇХ НАПИЛЕННЯ

¹⁾Лендєл В. В., ²⁾Степахно І. В., ¹⁾Яровой Л. К.

¹⁾Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інституту імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: yarovoi@univ.kiev.ua

Для розробки та технології виготовлення різноманітних приладів оптоелектроніки та оптичних наносенсорів важливо прецизійно контролювати товщину нанорозмірних плівок прозорих матеріалів під час їх нанесення на підкладку. Наприклад, лабораторні дослідження в хімічній і фармацевтичній промисловості та екології, зокрема для моніторингу якості повітря застосовують високочутливі прилади на основі явища поверхневого плазмонного резонансу (ППР) [1-2] та газового аналізу [3]. Зазвичай контроль товщини плівки виконують за допомогою фотометричного методу, заснованого на інтерференції хвиль в плівці без поглинання, товщина якої співрозмірна з довжиною хвилі. Фактично вимірюється оптична товщина шару, або фазовий зсув зондувального променя. Ми пропонуємо підхід, який дозволить суттєво підвищити точність цих методів.

Запропонований підхід – це (трихвильова) гетеродинна інтерферометрія (ТГІ), інакше – TWI (three waves interference) [5], що базується на трихвильовому фотозмішуванні [4], Метод ТГІ розроблено для критичного збільшення чутливості до малих амплітуд коливань лазерних доплерівських віброметрів (ЛДВ) та підвищення їх заводо захищеності [6]. В інтерференційних рефрактометрах, так само, як і в ЛДВ, досліджуваним параметром є фаза оптичного випромінювання. Тому наробки ТГІ в ЛДВ можуть бути застосовані і в рефрактометричних вимірюваннях.

Принцип методу пояснюється за допомогою рис. 1, на якому умовно зображені три інтерферуючих промені. Промінь e_0 , частота якого зсунута на частоту гетеродину f_G , залишається всередині інтерферометра, в той час, як два інших промені – зондувальний e_1 та додатковий третій промінь e_2 – мають розповсюджуватися якомога ближче один до одного. Три зазначених хвилі інтерферують на фотодетекторі інтерферометра і результатом фотозмішування є сигнал, що визначається співвідношенням [6]:

$$u(t) = -\frac{m}{2}\Omega \cdot \left[1 + \frac{(\eta^2 - 1)}{2\eta \cdot \cos(\Phi_M - \phi_2) + \eta^2 + 1} \right] \sin(\Omega t), \quad (1)$$

де $e_1 = E_1 \exp(-i \cdot (\omega_{opt} t + \Phi_M(t) + \phi_1))$, $e_2 = E_2 \exp(-i \cdot (\omega_{opt} t + \phi_2))$ відповідно амплітуди хвилі гетеродину, зондувальної хвилі та додаткової хвилі, $\Phi_M = m \cdot \cos(\Omega t) + \phi_1$, ϕ_2 – їх фази, Ω , m – частота та індекс фазової модуляції зондувальної хвилі e_1 , $\eta = E_1 / E_2$ а E_1, E_2 – амплітуди зондувальної та додаткової третьої хвилі.

Слід звернути увагу на те, що у цьому співвідношенні відсутні параметри першої хвилі, яка виконує роль сигналу гетеродина і лише зсуває спектр сигналу на частоті гетеродину.

Особливістю сигналу ТГІ $u(t)$ є наявність значного підвищення його амплітуди, коли хвилі e_1 та e_2 знаходяться в протифазі. Позначимо $\phi_2 - \phi_1 = \pi - \delta\phi$. Розрахунки показують, що амплітуда

$U(\delta\phi, \eta) = -m\Omega\eta \cdot \left(\frac{\eta - \cos(\delta\phi)}{1 - 2\eta \cdot \cos(\delta\phi) + \eta^2} \right)$ детектованого сигналу $u(t)$ сягає максимуму при

$\delta\phi = 0$ і збільшується в $\alpha = \frac{\eta}{\eta - 1}$ разів порівняно з класичним двопробним гетеродинним інтерферометром [7].

На практиці це зменшує в α разів вплив зовнішніх фазових завод на канал e_1 і, відповідно, збільшує чутливість методу. Симуляція на рис. 3 демонструє зростання фазомодульованого сигналу попри заводи, що впливають на канали інтерферометра.

З іншого боку диференційна чутливість амплітуди детектованого сигналу до зміни фази

$$\nu = \frac{d(U)}{d(\delta\phi)} = m\Omega\eta \cdot \left(\frac{\sin(\delta\phi)(\eta^2 - 1)}{(1 - 2\eta \cdot \cos(\delta\phi) + \eta^2)^2} \right)$$

зростає ще більш критично.

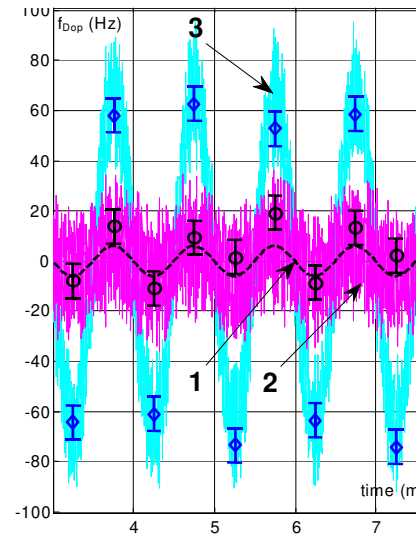
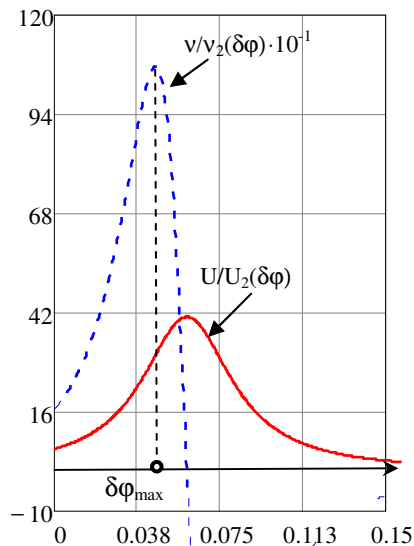
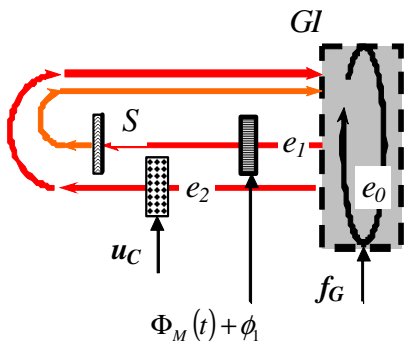


Рис.1. Схема гетеродинного інтерферометра-рефрактометра (GI) з трьома каналами: S – тестувальний зразок

Рис. 2. Залежність відносних рефрактометричних характеристик α та ν/ν_2 від фазового набігу в плівці ($\eta=1.025$)

Рис. 3. Симуляція: 1 – сигнал двопробного інтерферометра, 2 – завада, 3 – сигнал ТГІ інтерферометра

Наприклад, при $\eta=1.1$ $\alpha=11$, $\nu/\nu_2=65$ (ν_2 – чутливість двопробного інтерферометра). А при $\eta=1.025$ вже $\alpha=25$, та $\nu/\nu_2 \approx 10^3$! Таке значне збільшення чутливості відбувається за рахунок того, що область підвищення чутливості до фази локалізована в невеликому проміжку поблизу $\delta\phi=0$. Звичайно, цю зону можливо підлаштовувати, вносячи керований фазовий зсув $\delta\phi_0$ в один з каналів.

На рис. 2 $\delta\phi_0=0.06$, значення максимальної чутливості в точках $\delta\phi_{\max}=0.0455, 0.0745$, $\nu/\nu_2=1060$.

Оцінка чутливості метода до вимірювання фазового набігу $\delta\phi$ або товщини шару прозорого матеріалу $\delta x = \frac{\delta\phi \cdot \lambda}{2\pi \cdot n}$, де n – показник заломлення, дають такі результати: для $\lambda=0.63 \text{ мкм}$, $n=1.6$, $\Omega=1 \text{ кГц}$, $m=2 \cdot 10^{-3}$, похибки сигналу $u(t)$ (частота) = 0.01%, $\eta=1.1$ отримаємо: $\delta\phi_{\min} \approx 1.5 \cdot 10^{-5}$, $\delta x_{\min} \approx 0.1 \text{ нм}$. В той же час, для $\eta=1.025$ результати будуть такі: $\delta\phi_{\min} \approx 3.8 \cdot 10^{-6}$, $\delta x_{\min} \approx 0.025 \text{ нм}$.

Недоліком методу є значна нелінійність, яка обмежує діапазон вимірювань, але певною мірою вона може бути скомпенсована вибором $\delta\phi_0$.

Також необхідно дотримуватись стабільності обраного співвідношення амплітуд η , а запорукою зменшення впливу зовнішніх завад в α разів на вихідний сигнал $u(t)$ є розповсюдження хвиль e_1 та e_2 в близьких умовах.

Ключові слова: інтерферометрія, рефлектметрія, вимірювання товщин плівок.

Література

- [1] G. V. Dorozinsky, A. I. Liptuga, V. I. Gordienko, V. P. Maslov, V. V. Pidgorniy, «Diagnostics of motor oil quality by using the device based on surface plasmon resonance phenomenon», *Scholars Journal of Engineering and Technology*, vol. 3. pp. 372-374, 2015.
- [2] K. V. Kostyukevych, R. V. Khristosenko, Yu. M. Shirshov, S. A. Kostyukevych, A. V. Samoylov, V. I. Kalchenko, «Multi-element gassensor based on surface plasmon resonance: recognition of alcohols by using calixarene films», *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, vol. 14, No. 3, pp. 313-320, 2011.
- [3] В. В. Ільченко, О. М. Костюкевич, В. В. Лендел, В. І. Радько, Н. С. Голобородько, «Про механізм впливу газового середовища на електрофізичні параметри гетероструктур на основі бар'єра Шотткі з наноструктурованими плівками складу (95% In₂O₃ + 5% SnO₂)», *Український фізичний журнал*, Т. 61, № 1, с. 40-45, 2016.
- [4] L. Yarovoi, G. Siegmund, «The effect of three-wave interference in laser Doppler vibrometry», *Meas. Sci. Technol*, vol. 15, № 10, pp. 2150–2156, 2004.
- [5] Л.К. Яровой, «Аналіз трьох хвильової інтерференції в лазерному вібретрі», *Вісник Київського університету. Серія: фізико-мат. науки*, Вип. 4, с. 116-121, 2005.
- [6] Д. О. Іващенко, Л. К. Яровой, В. І. Розумнюк, «Світловодний сенсор механічних коливань з підвищеною чутливістю в нанометровому діапазоні», *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*, Вип. 4, с. 47–51, 2012.
- [7] L. Yarovoi, I. Stepakhno, «A novel approach to reduce the influence of external conditions on the laser Doppler vibrometer signal acting in the nanometer range», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1149, pp. 012023-1 – 012023-8, 2018.

УДК543.421/424

**МОДУЛЬ З КЮВЕТОЮ ДЛЯ ОПТИЧНОЇ ЕКСПРЕСМЕТРІЇ
ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА**

Таранов В. В., Пирогов А. Е.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інституту імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: lambit@ukr.net

Контроль фізико-хімічних параметрів у реальному часі породжує все більше нових технічних рішень для реалізації поставленого завдання. Сьогодні тільки на території Києва понад 3 десятки метеостанцій, від яких в реальному часі можна отримати дані про температуру, вологість, швидкість вітру. Інший ряд вимірювачів, зокрема для визначення розмірних часток домішок у атмосфері стає також доступним [1].

Стан водного середовища до недавнього часу був недоступний для моніторингу, оскільки існуючі апарати є досить громіздкими і коштовними. Аналізуючи базу даних водопровідної води, спостерігаються різні тенденції забруднюючих речовин, наприклад, в Міннесоті (США) виявлено 97 джерел, серед найбільш поширених забруднень у штаті виявлено радій та нітрати, їх ідентифікували у більш ніж 100 000 будинках.

Спираючись на сучасну елементну базу та отриманий досвід, ми перейшли до створення вітчизняних малогабаритних вимірювальних модулів. Сьогодні