

4. Практично реалізувати розрахунки за цим методом, у випадку многошарового покриття більш доцільно за допомогою комп'ютера.

1. Суржко А.И. *Защити свой сервер // Служба безопасности.* – 1999. – №11–12. – С.17.
2. ОСТ 4ГО.054.102 “Поглотители высокочастотной энергии”. 3. Саусворт Дж.К. *Принципы и применения волноводной передачи. Пер. с англ. Под ред. Сушкевича В.И.* М.: Сов. Радио, 1955. – 700 с.
4. Демьянчук Б.А. *Принципы и применения микроволнового нагрева.* Одесса: Черноморье. 2004. – 520 с.
5. Мицмахер М.Ю., Торгованов В.А. *Безэховые камеры СВЧ.* – М.: Радио и связь, 1982. – 128с.
6. Машуня Е.П. и др. *Электропроводность термопластических композиций, содержащих дисперсный токопроводящий наполнитель // Композиционные полимерные материалы.* – 1989. – № 43. – С.24–38.
7. Демьянчук Б.А. *Основы технологии согласования волновых сопротивлений на границе раздела воздуха и ферромагнитной среды // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2004. – №5. – С. 19–22.

УДК 535.417

О.М. Мокрий

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра фотоніки

## **ЧАСТОТНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ЧУТЛИВОСТІ ІНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА ПРИ РЕЄСТРАЦІЇ ПОВЕРХНЕВИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ**

© Мокрий О.М., 2007

О.М. Mokryy

## **FREQUENCY DEPENDENCE OF SENSITIVITY OF THE MICHELSON INTERFEROMETER AT DETECTION OF THE SURFACE ACOUSTIC WAVES**

© Mokryy O.M., 2007

Розглянуто метод реєстрації поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) за допомогою інтерферометра Майкельсона у випадку, коли оптичні промені, що інтерферують, утворюють деякий кут між собою. Створено числову модель, яка описує процес реєстрації ПАХ. Проаналізовано залежність чутливості вимірювальної схеми від частоти ПАХ і параметрів оптичного променя. За допомогою числового моделювання доведено, що чутливість цієї схеми залежить від частоти ПАХ.

The method of detection of surface acoustic waves (SAW) using Michelson interferometer in the case when interferential optical beams consist certain angle between each other has been considered. The numerical modelling of detection process of SAW was described out. The dependence of sensitivity of measurement setup from frequency of the SAW and parameters of optical ray has been analysed. The numerical simulation has showed that the sensitivity of this scheme is dependent on frequency of SAW.

### **Вступ**

Поверхневі акустичні хвилі використовуються в акустoeлектроніці, сенсорній техніці, неруйнівному контролю поверхні. Також такі хвилі широко застосовуються для обробки сигналів. Важливим елементом технології застосування ПАХ є методика їхнього детектування. Найпоширеніші способи детектування ПАХ ґрунтуються на використанні п'єзоелектричних перетворювачів. Часто

використання таких перетворювачів ґрунтується на їхній спектральній селективності при збудженні та реєстрації акустичних хвиль. Останнім часом все більшого поширення набувають оптичні методи детектування ПАХ, які мають переваги, пов'язані з їхньою безконтактністю [1–4]. Одна з таких методик ґрунтується на використанні інтерферометра Майкельсона. Треба зазначити, що особливістю використання такої методики є її широкосмуговість, що дає змогу реєструвати ПАХ до частот 1 ГГц [1]. Разом з тим інтерферометр Майкельсона може бути використаний і для частотно селективної реєстрації ПАХ. У роботі [5] запропонована схема використання інтерферометра Майкельсона, в якій промені, що інтерферують, утворюють невеликий кут між собою. Така схема дозволяє детектувати ПАХ лише в певній смузі частот. У роботі аналізується залежність частотної чутливості такої схеми детектування від параметрів оптичного пучка інтерферометра.

### Методика детектування ПАХ

Схему детектування ПАХ з використанням інтерферометра Майкельсона приведено на рис. 1 [5]. Промінь від лазера ділиться світлоподільником на два, один з яких падає на зразок, вздовж поверхні якого проходить ПАХ, а інший потрапляє на дзеркало. Після відбивання обидва промені інтерферують на поверхні фотоприймача. При поширенні ПАХ по зразку деформується його поверхня, що приводить до зміни різниці ходу між плечами інтерферометра і відповідно змінюється розподіл інтенсивності інтерференційної картини на чутливій ділянці фотоприймача. З іншого боку, в цій схемі вимірювань промені, що інтерферують, утворюють невеликий кут між собою, що приводить до виникнення інтерференційної картини у вигляді просторово-періодичної системи смуг. Ширина інтерференційних смуг визначається кутом між променями. Така інтерференційна картина утворюється завдяки двом механізмам: статичному, пов'язаному із кутом між променями, та динамічному, який спричинений зміщенням поверхні зразка під впливом ПАХ. Треба зазначити, що таке зміщення поверхні зразка є дуже незначне і становить, як правило, кілька нанометрів. Фотоприймач реєструє інтегральну потужність, яка потрапляє на нього. Чутливість вимірювальної схеми залежить від співвідношення між довжиною ПАХ та шириною інтерференційних смуг. Ця залежність визначає смугу частот ПАХ, в якій чутливість інтерферометра буде максимальною. Крім того, інтерференційна картина залежить від розбіжності оптичних променів та різниці ходу між плечами інтерферометра, тобто тими параметрами, які також впливають на вигляд інтерференційної картини.

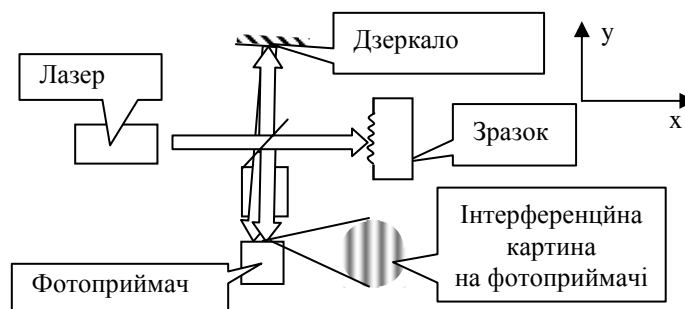


Рис. 1. Схема реєстрації ПАХ з допомогою інтерферометра Майкельсона

### Числова модель

Під час розгляду схеми інтерферометра приймали, що інтенсивність, а також поляризація променів, що інтерферують, є однаковою. Розглядався випадок, коли частота ПАХ лежить в області від одиниць до десятків мегагерц. Амплітуда ПАХ приймалась рівною кільком нанометрів. При таких умовах не проявляється відхилення променя внаслідок його дифракції на ПАХ. Також кути нахилу поверхні зразка внаслідок поширення ПАХ є достатньо малі і не приводять до помітного кутового відхилення відбитого променя. Отже, найвагомим результатом взаємодії оптичного

променя та поверхні зразка, через яку поширюється ПАХ, є зміна різниці ходу відповідно до зміщення поверхні. У цьому випадку інтенсивність у деякій точці інтерференційної картини визначатиметься виразом [6, 7]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1)$$

де  $I_1$  – інтенсивність пучка, відбитого від дзеркала,  $I_2$  – інтенсивність пучка, відбитого від зразка,  $\delta$  – різниця фаз між оптичними променями.

Різниця фаз  $\delta$  може виникнути внаслідок різних причин і в загальному випадку є різною в різних точках інтерференційного поля. За різниці плеч інтерферометра, а також розбіжності оптичних пучків можна записати [8]:

$$\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (2d + d(\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta)), \quad (2)$$

де  $\lambda$  – довжина оптичної хвилі,  $d$  – різниця ходу між плечами інтерферометра,  $\alpha, \beta$  – кути між вісю інтерферометра та напрямом поширення променя в двох перпендикулярних площинах відповідно.

У випадку, коли один промінь поширюється паралельно осі інтерферометра, а інший під невеликим кутом  $\phi$  до цієї осі, то зсув фаз між ними описується виразом [5]:

$$\delta_3 = \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \phi, \quad (3)$$

де  $x$  – координата в площині інтерференційної картини. При цьому утворюються періодичні інтерференційні смуги шириною  $L = \lambda / \sin \phi$ .

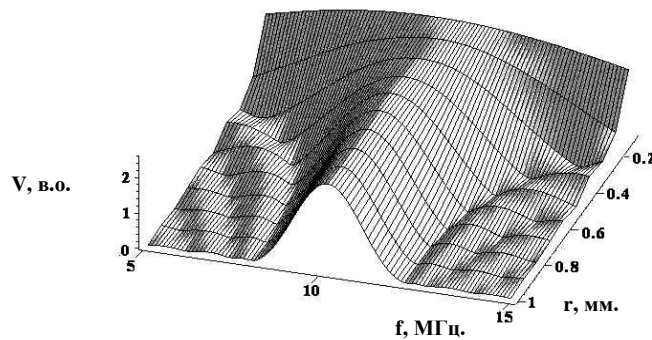


Рис. 2. Залежність чутливості від частоти ПАХ та радіуса фотоприймача. Розбіжність оптичного пучка дорівнює 0,002 рад

Особливістю використання інтерферометра Майкельсона для реєстрації ПАХ є те, що поверхня зразка, через яку поширюється хвиля, зміщується під дією ПАХ і може бути описана виразом:

$$x = h \sin(\omega t + \frac{2\pi}{\Lambda} y) + x_0, \quad (4)$$

де  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота ПАХ,  $\Lambda$  – довжина ПАХ,  $h$  – амплітуда ПАХ.

Вирази (1–4) дають змогу знайти часову залежність просторового розподілу інтенсивності інтерференційної картини. Фотоприймач реєструє інтегральну оптичну потужність інтерференційної картини в кожний момент часу. Сила струму з фотоприймача дорівнює:

$$i = g \int_{-r}^r I dx, \quad (5)$$

де  $r$  – радіус оптичного променя,  $g$  – коефіцієнт пропорційності. Вважається, що весь пучок потрапляє на чутливу ділянку фотоприймача.

Для характеристики схеми реєстрації ПАХ було використано величину  $V$ , яка є чутливістю :

$$V = \frac{1}{r \int_{-r}^r I(x) dx} (i_{\max} - i_{\min}), \quad (6)$$

де  $i_{\max}$ ,  $i_{\min}$  – максимальна та мінімальна сили струму фотодетектора, зареєстровані за час, що дорівнює періоду ПАХ.

### Результати числового експерименту та його обговорення

За виразами (1–6) можна знайти залежність величини  $V$  від параметрів інтерферометра Майкельсона та частоти ПАХ. Розрахунки робились для значення  $d=1$  мм, радіус оптичного променя дорівнював 1 мм. Значення швидкості ПАХ при розрахунках вибиралось 2500 м/с. Приймався гауссівський розподіл інтенсивності за перерізом пучка. Розглядалась геометрія експерименту, в якій проекція фронтів ПАХ на площину фотоприймача паралельна інтерференційним смугам, які виникають внаслідок нахилу дзеркала.

Результати числового експерименту показано на рис. 2. Наведений графік показує залежність чутливості вимірювальної схеми від частоти ПАХ і радіуса  $r$ . Видно, що спостерігається сильна залежність смуги пропускання від  $r$ . За малих значень  $r$  чутливість є великою в широкій смузі частот, а із зменшенням  $r$  смуга зменшується і за центральної частоти 10 МГц становить близько 1 МГц за рівнем 0.5. Отже, коли ширина оптичного пучка більша за довжину ПАХ, спостерігається частотно селективна залежність чутливості. Максимальна чутливість спостерігається у випадку, коли довжина акустичної хвилі збігається із шириною інтерференційної смуги. У нашому випадку ця величина становила 0,25 мм.

Також розраховано частотну залежність чутливості вимірювальної схеми від розбіжності оптичного променя  $\gamma$ . Радіус пучка дорівнював 1 мм. Результати розрахунків наведено на рис. 3.

Видно, що величина розбіжності істотно впливає на частотний інтервал, в якому ця вимірювальна схема може реєструвати ПАХ. При збільшенні розбіжності зростає діапазон частот ПАХ, за якими можна їх реєструвати. У випадку малої розбіжності оптичного променя частотний діапазон акустичних хвиль, які можна зареєструвати, зменшується. Для пояснення результатів, показаних на рис. 3, наведено розподіл інтенсивності в інтерференційній картині (рис. 4). При цьому для наочності кут між променями вибирають 0,001 рад., тобто вдвічі менший, ніж у випадку, показаному на рис. 2–3. З наведених результатів на рис. 4 видно, що із збільшенням розбіжності зростає кривизна інтерференційних смуг. Відповідно умова паралельності інтерференційних смуг і проекцій фронтів ПАХ на інтерференційну картину частково порушується. Це приводить до зменшення чутливості, а також до розширення частотної смуги чутливості схеми. За малої розбіжності величиною 0,002 рад. інтерференційні смуги практично паралельні, і частотна смуга чутливості схеми звужується. З іншого боку, із збільшенням розбіжності оптичного променя ширина інтерференційних смуг є різною вздовж інтерференційної картини, як видно на рис. 4, в, що приводить до розширення частотної смуги чутливості. Вплив розбіжності оптичного пучка на форму інтерференційних смуг визначається виразом (2). З нього видно, що розбіжність оптичного променя себе проявлятиме розподілом інтенсивності інтерференційної картини при  $d$ , відмінному

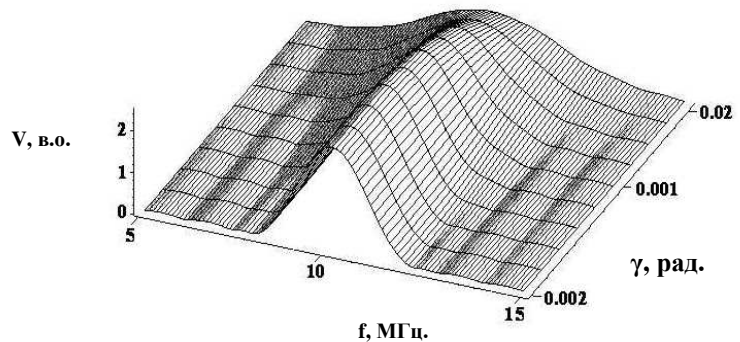


Рис. 3. Залежність чутливості від розбіжності оптичного пучка та різниці ходу ( $d=1$  мм)

від нуля. Також збільшення величини  $d$  за постійного значення розбіжності теж приведе до збільшення кривизни інтерференційних смуг аналогічно до показаних на рис. 4 і відповідно до розширення частотної смуги чутливості вимірювальної схеми.

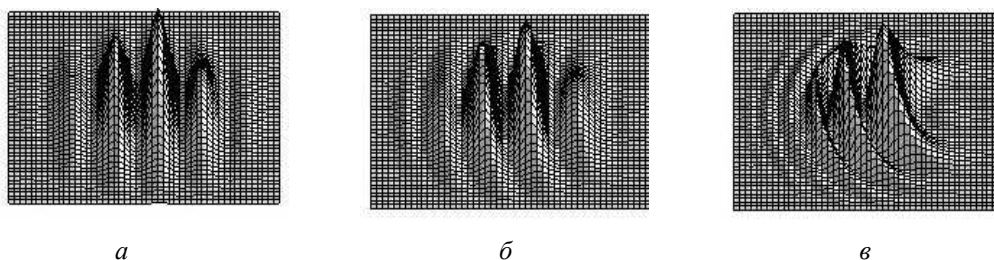


Рис. 4. Розподіл інтенсивності в інтерференційній картині, що інтерферують залежно від розбіжності оптичного пучка: а – 0,002 рад; б – 0,01 рад; в – 0,02 рад. при куті між інтерферуючими променями 0.001 рад. і різниці ходу між плечами інтерферометра  $d=1$  мм

### Висновки

Розглянуто схему детектування поверхневих акустичних хвиль із застосуванням інтерферометра Майкельсона, в якій промені, що інтерферують, утворюють деякий кут між собою. Проаналізовано на основі числової моделі зміну інтенсивності інтегральної інтерференційної картини, яка утворюється на поверхні фотоприймача в процесі поширення поверхневої акустичної хвилі. На основі числових розрахунків отримано залежність чутливості вимірювальної схеми від частоти поверхневої хвилі, а також радіуса оптичного променя і його розбіжності. У результаті числового аналізу показано, що ця вимірювальна схема має частотно-селективну залежність чутливості. Вид частотної залежності чутливості є функцією від величини розбіжності оптичного променя і його радіуса.

1. Knuuuttila J.V., Tikka P.T., Salomaa M.M. Scanning interferometer for imaging surface acoustic wave fields, //Optics Letters, 2000, Vol.25, N 9. – P. 613–615. 2. Wagner J.W. Optical Detection of ultrasound // Physical Acoustics: Ultrasonic Measurement Methods, v.XIX (R.N.Thurston ed.), 1990. – P. 201–265. 3. Stratoudaki T., Clark M., Somech M.G. Novel Optical Transducers for Non-Linear Ultrasonic Applications//ECNDT 2006 – Tu.4.7.3. 4. Mizutani K., Nemoto M., Ezure T., Masuyama H. Visualization of Ultrasonic Beam Using Michelson Interferometer/ Jpn. J. Appl. Phys. 2003 Vol.42, pp. 3072–3075. 5. Мокрий О.М., Кошовий В.В., Романишин І.М., Шарамага Р.В. Нова схема детектування поверхневих акустичних хвиль з використанням інтерферометра Майкельсона //ЛЕОТЕСТ 2007. – С. 155–161. 6. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. – М.: Мир, 1982. – 504 с. 7. Нагибина И.М., Москалев В.А., Полушкина Н.А., Рудин В.Л. Прикладная физическая оптика. – М.: Высшая школа, 2002. – 565 с. 8. D.Stone Bryan Modeling interferometers with lens design software/ Opt.Eng. July 2000, 39(7). – P. 1748–1759.