

УДК 535.14

М.В. Цигика, І.М. Стойка, О.О. Грабар

Ужгородський національний університет, фізичний факультет,  
вул. Волошина, 54, 88000, Ужгород  
e-mail: mv.tsyhyka@gmail.com

## ДИНАМІЧНИЙ ІНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВІ ФОТОРЕФРАКТИВНОГО ЕФЕКТУ В КРИСТАЛІ $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$

В роботі представлено результати досліджень амплітудно-частотних характеристик лазерного динамічного інтерферометра на основі фоторефрактивного кристала  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6:\text{Sb}$ . Показано, що такий інтерферометр може використовуватися для оптичної дистанційної реєстрації акустичних мікроколивань у широкому діапазоні частот; при цьому «частота зрізу» інтерферометра, що визначає робочий діапазон акустичних частот, залежить від інтенсивності лазерного променя.

**Ключові слова:** фоторефрактивний ефект, динамічна голографія,  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ , динамічний інтерферометр.

### Вступ

Можливість формування динамічних голограм у фоторефрактивних (ФР) кристалах зумовлює їх застосовність у інтерферометричних схемах, котрі дозволяють реєструвати малі динамічні зміни фази одного із взаємодіючих променів. Це дає змогу, наприклад, дистанційно реєструвати акустичні коливання поверхні, від якої відбивається (чи на якій розсіюється) лазерний промінь. Такі інтерферометри особливо ефективні в оптоакустичних схемах, де акустичні коливання збуджуються лазерним імпульсом.

Для детектування фазової модуляції світлового променя можуть бути використані різні інтерференційні схеми, зокрема пасивні інтерферометри типу Майкельсона [1], Маха-Цендера [2], конфокальні резонатори Фабрі-Перо [3] тощо. Однак їх недоліком є те, що вони вимагають високої механічної стабілізації, оскільки є чутливими до різних механічних та оптичних шумів. Використання динамічного голографічного інтерферометра (ДГІ) дозволяє зробити вимірвальну систему адаптивною до складної структури хвильових фронтів, що відбиваються від об'єктів, в тому числі з недзеркальною поверхнею, а також до коливань з частотами, меншими за обернений час релаксації динамічного гологра-

фічного середовища (тобто ФР кристала) [4-8]. ДГІ мають низку переваг і можуть застосовуватися в схемах лазерної ультразвукової діагностики, при реєстрації нанозміщень мікрооб'єктів, чи динамічній обробці зображень (фільтри змін), при цьому мають високу чутливість і стійкість до завад.

В даній роботі розглянуто особливості застосування ФР кристала  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ , легованого Sb, як активного елемента ДГІ з використанням випромінювання гелій-неонового лазера, та досліджені основні параметри такої схеми, зокрема амплітудно-частотні характеристики, робочі частоти зрізу при різних амплітудах акустичних коливань та потужностях лазерного випромінювання.

### Схема експерименту

Схема ДГІ на основі ФР кристала  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  показана на рис. 1.

В даній схемі промінь гелій-неонового лазера 1 (довжина хвилі 633 нм, потужність 10 мВт) за допомогою напівпрозорого дзеркала 2 розділяється на два пучки; сигнальний промінь, відбиваючись від поверхні 8, що коливається, зазнає фазової модуляції. Обидва промені, сигнальний  $I_{SO}$  і опорний  $I_{RO}$ , інтерферують в об'ємі ФР кристала 5, де записують динамічну фазо-

ву ґратку. Оптична схема була зібрана на голографічному столі УИГ-22м.

У кристалах типу  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  дана ґратка формується завдяки дифузії нерівноважних носіїв заряду. Тому ґратка показника заломлення, екстремуми якої співпадають з екстремумами електричного поля, що пропорційні градієнту заряду, є нелокальною, тобто зміщена на чверть періоду відносно дифракційної картини. Внаслідок самодифракції променів на такій нелокальній ґратці сигнальний промінь підсилюється за рахунок енергообміну з опорним пучком.

Процеси формування та релаксації ФР ґраток характеризуються певним часом  $\tau_g$ , тому такі ґратки «відслідковують» повільну фазову модуляцію з частотами, меншими ніж обернений час релаксації ґратки. При високих частотах модуляції ФР ґратка не встигає формуватися, що впливає на інтенсивність самодифракції і може бути зареєстровано по зміні інтенсивності взаємодіючих променів.

Для реєстрації коливань акустичного частотного діапазону як активний ФР елемент найчастіше застосовуються напівпровідникові ФР матеріали типу  $\text{CdTe}$  [6, 7],  $\text{InP}$  [8],  $\text{GaP}$ ,  $\text{GaAs}$ , чи відносно «швидкі» кристали типу силеніту [5], що характеризуються короткими часами формування ФР ґраток – в діапазоні долей мілісекунд. Проте усі ці кристали мають невисокі коефіцієнти двохвильової взаємодії, а  $\text{CdTe}$  та  $\text{InP}$  прозорі лише в ІЧ діапазоні. Інтерферометри, реалізовані на основі різних ФР кристалів, суттєво різняться за комбінацією основних досягнутих параметрів [5], тому пошук та дослідження характеристик нових середовищ має практичний інтерес.

У наших експериментах використовувався кристал  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6:\text{Sb}$ , який характеризується найвищим серед легованих кристалів цього типу максимальним значенням коефіцієнта двохвильової взаємодії та порівняно швидким ФР відкликом (порядка 10 мс) на довжині хвилі гелій-неонового лазера (633 нм) [9, 10].

Зразок з розмірами  $\sim 5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$  був вирізаний вздовж головних осей, полірований та поляризований. Така орієнтація

зразка забезпечує максимальну двохвильову взаємодію і є типовою для більшості ФР досліджень [9, 10]. Вона відповідає такій геометрії експерименту, коли вхідна і вихідна грані паралельні кристалографічній площині (001), а хвильовий вектор ФР ґратки направлений по [100]. При цьому промені поширюються і поляризовані в площині паралельній до (010).

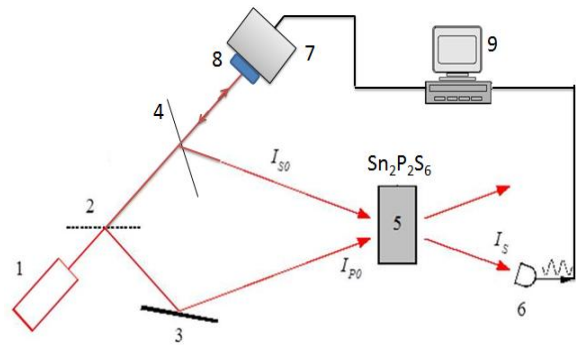


Рис. 1. Схема ДГ на основі ФР кристала. Тут 1 – He-Ne лазер; 2 і 4 – напівпрозорі дзеркала; 3 – дзеркало; 5 – ФР кристал; 6 – фотодіод; 7 – модулятор коливань; 8 – рухоме дзеркало, 9 – блок реєстрації (АЦП), керований комп'ютером.

Акустичний сигнал, що детектувався схемою зображеною на рис. 1, генерувався електродинамічним дифузорним гучномовцем, до мембрани якого прикріплювалося мале дзеркальце. Коливання збуджувались сигналом, що генерувався на акустичному виході звукової плати комп'ютера програмою Marchard Function Generator. Ця програма дає можливість керувати частотою і амплітудою сигналу та змінювати форму періодичного сигналу. В наших дослідах використовувався синусоїдальний сигнал в діапазоні частот 1 Гц – 1 кГц.

Таким чином, створювалися коливання дзеркала і, відповідно, модуляція фази відбитого сигнального лазерного променя. Після проходження через кристал сигнальний пучок  $I_s$  спрямовувався на фотодіод та реєструвався АЦП і комп'ютером.

### Експериментальні результати

Результати вимірювань інтенсивності сигнального променя від частоти акустичної модуляції приведені на рис. 2. Видно, що при малих частотах акустичні коливан-

ня (фазова модуляція сигнального пучка) не впливає на амплітуду динамічної ґратки в ФР кристалі, тому підсилення сигнального пучка максимальне і практично не відрізняється від статичного випадку. В умовах даного експерименту (інтенсивність променів 15 мВт, відношення інтенсивностей 1:50, кут між променями  $25^\circ$ , горизонтальна поляризація) у ФР кристалі отримувалося підсилення інтенсивності сигнального променя у  $20 \div 100$  разів. При частотах більших, ніж обернений час релаксації ФР середовища, ґратка не встигає формуватися, тому голографічне підсилення відсутнє і вимірюваний сигнал  $I_S$  мінімальний. В обох крайніх випадках інтенсивність сигналу відносно стабільна в часі. При частотах, порівняних зі значенням частоти зрізу, спостерігається модульований характер змін інтенсивності  $I_S$ . Це ілюструють криві 2 і 3 на рис. 2, що відповідають частоті модуляції  $f = 6$  Гц та  $f = 9$  Гц, відповідно.

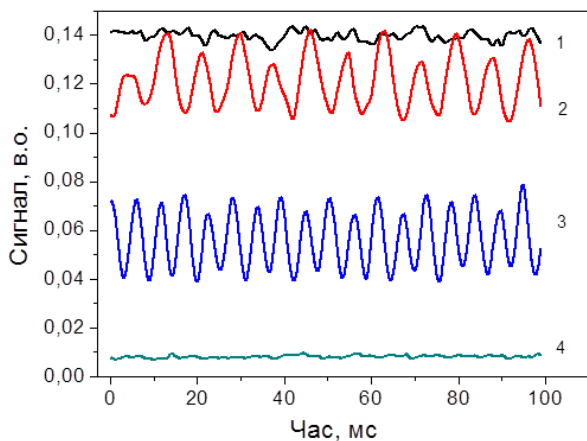


Рис. 2. Осцилограми оптичного сигналу при різних частотах акустичних коливань: **1** – 0 Гц, **2** – 6 Гц, **3** – 9 Гц, **4** – 100 Гц.

На частотній характеристиці динамічного інтерферометра (рис. 3), що відображує нормовану на максимальне значення залежність усередненої по часу інтенсивності сигнального променя від частоти фазової модуляції, в цьому діапазоні простежується перехід від максимального підсилення до нульового.

На рис. 3 представлені частотні характеристики для чотирьох амплітуд сигналу, що збуджував акустичні коливання (у відносній шкалі). Видно, що ці харак-

теристики зміщуються в область більших частот при зменшенні амплітуди коливання.

При певних частотах порядку 30 Гц на частотних характеристиках (рис. 3) спостерігаються додаткові максимуми і відхилення від нульового рівня (мінімального сигналу), що свідчить про наявність незначного підсилення, тобто про формування ґратки в ФР кристалі при частотах модуляції більших від оберненого часу релаксації. Це пояснюється технічними характеристиками використовуваних електродинамічних гучномовців, зокрема нерівномірністю АЧХ характеристики гучномовця в області низьких частот.

Однією з головних характеристик ДГІ є частота зрізу, яка визначається як частота фазової модуляції, при якій відгук інтерферометра дорівнює половині від максимального. Вона визначає максимальну частоту вібрацій, до яких інтерферометр ще буде чутливим. По порядку величини частота зрізу відповідає оберненому часу релаксації ФР ґратки при даних умовах. У наших дослідах положення частоти зрізу загалом корелює зі значеннями оберненого часу релаксації ФР ґраток у  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6:\text{Sb}$  при використовуваних потужностях: для типових для цих кристалів часів від 20 до 200 мс [10] частоти зрізу мають лежати в діапазоні 5 – 50 Гц (рис. 3).

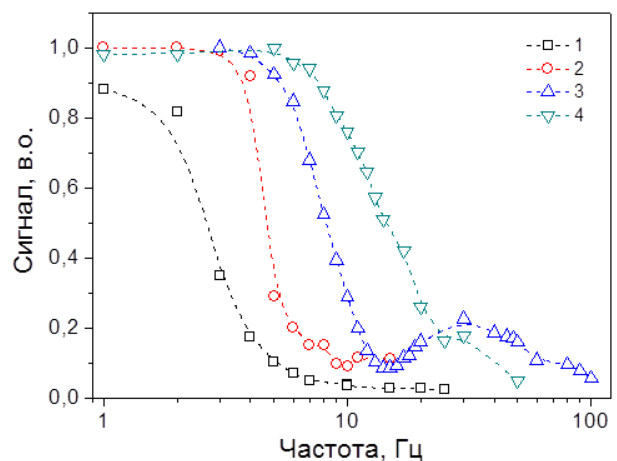


Рис. 3. Частотна характеристика динамічного інтерферометра на основі ФР кристала  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6:\text{Sb}$  ( $\lambda = 633$  нм,  $P = 15$  мВт) при різних значеннях амплітуд змінного сигналу, що подавався на гучномовець: **1** – 1 В, **2** – 0.5 В, **3** – 0.1 В, **4** – 0.05 В.

Оскільки частотні характеристики ДГІ визначаються сумарною інтенсивністю світлових променів, від якої залежить обернений час релаксації ФР голограм ( $\tau^{-1} \sim I$ ), проведені дослідження впливу інтенсивності лазерного випромінювання на частотну характеристику (рис. 4). Видно, що збільшення потужності лазерних променів призводить до зміщення частоти зрізу в область вищих частот. У діапазоні використовуваних інтенсивностей це зміщення незначне (2 - 3 Гц), проте при більших інтенсивностях може досягати вищих значень. Крім того, при цьому вищою стає чутливість ДГІ за рахунок зниження впливу сторонніх шумів на рівень сигналу.

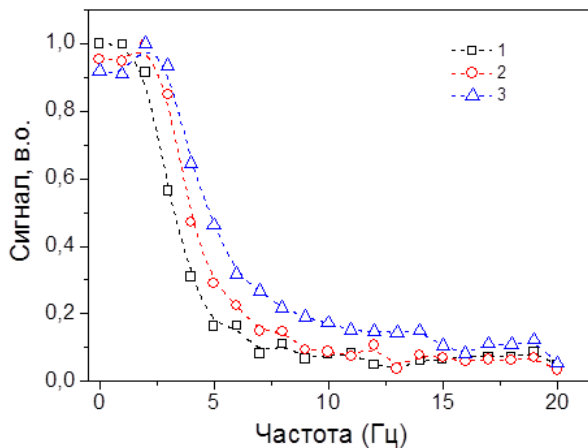


Рис. 4. Частотна характеристика динамічного інтерферометра в залежності від потужності лазерного випромінювання, мВт: 1 – 1.30, 2 – 2.86, 3 – 4.79.

На частоту ФР відклику, і відповідно частоту зрізу, може впливати також кут між променями, який визначає просторовий період динамічної ґратки. Проте, оскільки він визначається головним чином експериментальними умовами, і можливий діапазон змін (при однакових інших умовах) відносно невеликий, цей спосіб керування параметрами ДГІ є менш ефективним.

## Висновки

У роботі реалізовано динамічний голографічний інтерферометр на основі схеми двохвильової взаємодії з використанням фоторефрактивного кристала  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6:\text{Sb}$  та випромінювання гелій-неонового лазера (633 нм). Шляхом вимірювання інтенсивності сигнального променя, фаза якого модулювалася низькочастотними акустичними коливаннями, отримані амплітудно-частотні характеристики такого інтерферометра. При цьому характерні частоти зрізу лежать в області 4-8 Гц, і їх значення залежать як від амплітуди фазової модуляції, так і інтенсивності лазерних променів. Результати роботи свідчать, що даний кристал може використовуватися в схемах оптичної реєстрації низькочастотних мікроколивань як сенсор, що базується на вимірюваннях флуктуації фази лазерних променів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dewhurst R.J., Ewards C., McKie A.D.W. et al. A remote system for ultrasonic velocity measurement at high temperatures // *J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol.63. - №. 4. - P. 1225–1227.
2. Queheillalt D.T., Wadley H.G. Temperature dependence of elastic constants of solid and liquid  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$  obtained by laser ultrasound // *J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol.83. - №. 8. - P. 4124–4133.
3. Monchalın J.H. Optical Detection of Ultrasound at a Distance Using Confocal Fabry Perot Interferometer // *Appl. Phys. Lett.* – 1985. - Vol. 47. - №. 1. - P. 14–16.
4. Ing R.K., Monchalın J.P. Broadband optical detection of ultrasound by two-wave mixing in a photorefractive crystal // *Appl. Phys. Lett.* – 1991. – Vol.59. – № 25. – P. 3233–3235.
5. Kamshilin A.A., Romashko R.V. and Kulchin Y.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol.105. – P. 031101-1–10.
6. Shcherbin K., Klein M.B. Adaptive interferometers with no external field using reflection gratings in  $\text{CdTe}:\text{Ge}$  at 1550 nm // *Opt. Commun.* – 2009. – Vol. 282. – P. 2580–2585.

7. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Launay J.-C. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe:V // *Optics Express*. – 2007. – Vol.15. – №. 2. – P. 545–555.
8. Kamshilin A.A., Prokofiev V.V. Fast adaptive interferometer with a photorefractive GaP crystal // *Opt. Lett.* – 2002. – Vol. 27. – №. 19. – P. 1711–1713.
9. Grabar A., Jazbinsek M., Shumelyuk A., Montemezzani G., Vysochanskii Yu., Günter P. Photorefractive Effects in  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  // *Springer Series in Optical Sciences* – 2007. – Vol.114. – P. 327–362.
10. Kedyk I., Matthey P., Gadret G., Bidauld O., Grabar A., Fedyo K., Stoika I., Prits I., Vysochanskii Yu. Investigation of the dielectric, optical and photorefractive properties of Sb-doped  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  crystals // *Physics B: Lasers and Optics* – 2008. – Vol. 92. – P. 549–554.

Стаття надійшла до редакції 30.05.2013

M. Tsyhyka, I. Stoika, A. Grabar  
Uzhhorod National University, the faculty of Physics  
Voloshina Str., 54, 88000, Uzhhorod

## DYNAMIC INTERFEROMETER BASED ON PHOTOREFRACTIVE EFFECT IN THE CRYSTAL $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$

The paper presents measured amplitude-frequency characteristics of dynamic laser interferometer based on  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ :Sb photorefractive crystal. It is shown that such an interferometer can be used for optical remote registration of acoustic micro-oscillation in a wide frequency range, while the "cutoff frequency" of interferometer, which determines the operating range of acoustic frequencies, depends on the intensity of the laser beam.

**Keywords:** photorefractive effect, dynamic holography,  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ , dynamic interferometer.

М.В. Цигика, И.М. Стойка, О.О. Грабар  
Ужгородский национальный университет, физический факультет  
ул. Волошина, 55, 88000, Ужгород

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА БАЗЕ ФОТОРЕФРАКТИВНОГО ЭФФЕКТА НА КРИСТАЛЛЕ $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$

В работе представлены результаты измерений амплитудно-частотных характеристик лазерного динамического интерферометра на базе фоторефрактивного кристалла  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ :Sb. Показано, что интерферометр может использоваться для оптической дистанционной регистрации акустических микроколебаний в широком диапазоне частот; при этом «частота среза» интерферометра, определяющая рабочий диапазон акустических частот, зависит от интенсивности лазерного луча.

**Ключевые слова:** фоторефрактивный эффект, динамическая голография,  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ , динамический интерферометр.