

УДК 537.41

PACS 07.60.Ly, 42.40.Kw, 78.20.Mg

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.14-19

М.В. Цигика, А.А. Когутич, І.І. Стойка, О.О. Грабар

Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, 88000, Ужгород

e-mail: al\_grabar@hotmail.com

## ДИНАМІЧНИЙ ІНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВІ ФОТОРЕФРАКТИВНОГО КРИСТАЛА $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ МОДИФІКОВАНОГО ДИФУЗІЄЮ $\text{Cu}$

На основі фоторефрактивних параметрів модифікованих термодифузією атомів міді монокристалів  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  реалізовано двопроменевий динамічний інтерферометр. Показано, що частотний спектр коефіцієнта голографічного підсилення в даних кристалах має максимум внаслідок процесів компенсації. Одержано частотні характеристики такого інтерферометра.

**Ключові слова:** динамічний інтерферометр, фоторефрактивний ефект, двохвильова взаємодія, фазова модуляція, тіогіподифосфат олова.

### Вступ

Інтерферометричні схеми широко застосовуються при реєстрації малих змін фази лазерного променя, і використовуються в пристроях оптичного дистанційного контролю технологічних процесів, віброметрії, оптоакустики тощо. Такі вимірювання можуть бути ефективно реалізовані з використанням схем динамічної голографії з фоторефрактивними (ФР) кристалами у якості активних середовищ [1]. У такій схемі сигнальний лазерний промінь інтерферує з когерентним опорним променем в об'ємі фоторефрактивного кристала, і інтерференційна картина записується у виді динамічної фазової голограми. У випадку дифузійного механізму формування голограми, коли локальне поле виникає внаслідок дифузії фотозбуджених носіїв заряду та їх локалізації на дефектних рівнях, пропорційне градієнту концентрації локалізованих на дефектах носіїв заряду, і індукована таким локальним електричним полем внаслідок електрооптичного ефекту фазова динамічна голограма зміщена на чверть періоду відносно інтерференційної картини. Дифракція взаємодіючих променів приводить до перерозподілу їх інтенсивності. Залежно від знаку електрооптичного коефіцієнта та

типу фотоіндукованих носіїв заряду сформована таким чином фазова гратка (тобто ФР голограма) є зміщеною на чверть періода. Дифракція взаємодіючих променів на зміщеній гратці приведе до підсилення чи послаблення сигнального променя. Оскільки формування гратки носить динамічний характер, підсилення відбувається за певний час  $\tau$ . Модуляція фази одного з променів, зумовлена, наприклад, його відбиванням від вібруючого об'єкта, приводить до періодичного зсуву інтерференційної картини. Залежно від частоти такої модуляції буде змінюватися амплітуда ФР гратки, і відповідно ефективність енергообміну. Вплив фазової модуляції найбільш ефективно спостерігається в інтервалі її частот, близьких до  $1/\tau$ , і частотна залежність інтенсивності сигнального променя аналогічна дії "відрізаючого" фільтра, який підсилює сигнали з частотами фазової модуляції меншими від частоти зрізу  $\nu_{\text{зр}}$ , а при модуляції частотою набагато більшою за цю величину підсилення сигнального променя відсутнє.

Параметри ФР кристала визначають амплітудні та частотні характеристики даної схеми. Використання динамічного голографічного інтерферометра для детектування фазової модуляції світлового про-

меня дозволяє зробити вимірювальну систему адаптивною до складної структури хвильових фронтів, що відбиваються від об'єктів, у тому числі з недзеркальною поверхнею, а також до коливань з низькими частотами, меншими за обернений час релаксації динамічного голографічного середовища (ФР кристала). Крім того, такий динамічний інтерферометр дає можливість отримати інформацію не лише про частоту, а й амплітуду та фазу світлової хвилі, відбитої чи розсіяної об'єктом. З іншого боку, дослідження фоторефрактивного голографічного підсилення при фазовій модуляції взаємодіючих променів дозволяє отримати інформацію про динамічні характеристики ФР ефекту в кристалах.

Параметри схем динамічних інтерферометрів, реалізованих на основі легованого Sb кристала  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ , описані в роботах [1,2]. Вибір саме такого складу ФР кристалів був обумовлений тим, що він забезпечує максимальні значення коефіцієнта двохвильової взаємодії на довжині хвилі He-Ne лазера 633 нм [4,5]. Однак з цією метою можуть бути використані також інші леговані склади, які демонструють іншу комбінацію ФР характеристик, а експерименти з фазомодульованими взаємодіючими пучками дозволяють розширити методичний арсенал їх досліджень.

### Оптична схема

Двопроменева схема динамічного інтерферометра, яка використовувалась в даній роботі зображена на рис. 1. Вона є типовою, і базується на ефекті ФР підсилення сигнального лазерного променя більш інтенсивним опорним за рахунок енергообміну у ФР кристалі. Випромінювання He-Ne лазера 1 з довжиною хвилі 633 нм і потужністю ~5 мВт розділяється на два когерентні пучки напівпрозорим дзеркалом 3. Сигнальний промінь набуває фазової модуляції, відбиваючись від рухомого дзеркала, закріпленого на п'єзоелементі 5. До модулятора 5 прикладалася змінна напруга від звукового генератора 6 типу Rigol DG1022. Сигнальний

та опорний промені взаємодіють у ФР кристалі 4.

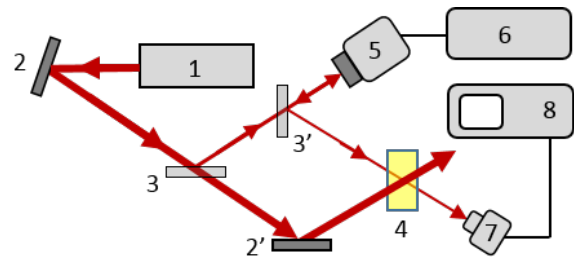


Рис. 1. Схема двопроменевого інтерферометра на основі ФР ефекту у кристалі  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ . 1 – He-Ne лазер, 2, 2' – дзеркала, 3, 3' – напівпрозорі дзеркала, 4 – ФР кристал, 5 – п'єзоелемент з дзеркалом, 6 – генератор, 7 – фотодіод, 8 – цифровий осцилограф.

Модульований за інтенсивністю сигнальний промінь реєструвався позаду кристалу кремнієвим фотодіодом 7 та цифровим осцилографом 8 типу OWON DS7102V. Осцилограми записувалися у виді цифрового масиву та оброблялися на комп'ютері.

В якості ФР елемента використовувався модифікований зразок  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  з розмірами  $6 \times 5 \times 5$  мм<sup>3</sup> уздовж кристалофізичних осей X, Y та Z відповідно. Вибір цих осей є стандартним для даного моноклінного кристалу [2-5], тобто Y є нормаллю до площини симетрії, а вісь X близька до полярного напрямку. Модифікація здійснювалася шляхом термодифузії Cu з поверхні зразка вздовж осі Y. Для цього шар металічної міді наносився електрохімічним способом на грань зразка, нормальну до осі Y, після чого зразок відпалювався у вакуумованій кварцовій ампулі протягом двох діб при температурі ~350°C. Це забезпечувало дифузію атомів міді практично по всій товщині зразка. Після відпалу зразок полірувався та монодоменізувався.

Поляризовані вздовж X лазерні промені проходили через перпендикулярну до Z грань кристала. Така орієнтація забезпечує максимальні значення коефіцієнтів двохвильової взаємодії і відповідно модуляції інтенсивності. Характерний час запису ФР ґратки для даного кристалу при заданій інтенсивності випромінювання складає десятки мілісекунд [4,5]. Викликані збуреннями фази вхідних пучків зміни ін-

тенсивності сигнального променя, що реєструються в схемі, приведеній на рис. 1, дають змогу отримати інформацію про характер фазової модуляції.

### Експериментальні результати

На рис. 2 наведена типова осцилограма, одержана в схемі, зображеній на рис. 1, при модуляції фази сигнального променя дзеркалом 5. Модуючий сигнал, який подавався на п'єзоелемент, відповідав амплітуді коливань 0.15 мкм, і також показаний на рис. 2 (пунктир). Видно, що сигнал інтерферометра відповідає подвоєній частоті фазової модуляції, що типово для ФР елементів з домінуючим дифузійним механізмом формування просторового заряду. Це пояснюється тим, що максимальне підсилення реалізується при зсуві стаціонарної ФР ґратки точно на чверть періода, і при її зсуві в обидва боки спостерігається зменшення коефіцієнта енергообміну  $\Gamma$ . Цей коефіцієнт експериментально визначається з співвідношення:

$$I_s(d) = I_s(0) \cdot \exp(\Gamma \cdot d), \quad (1)$$

де  $I_s(0)$  та  $I_s(d)$  – інтенсивності сигнального променя до та після взаємодії відповідно,  $d$  – товщина ФР зразка. Дане співвідношення справедливе у випадку коли  $I_s$  набагато менша за інтенсивність опорного променя.

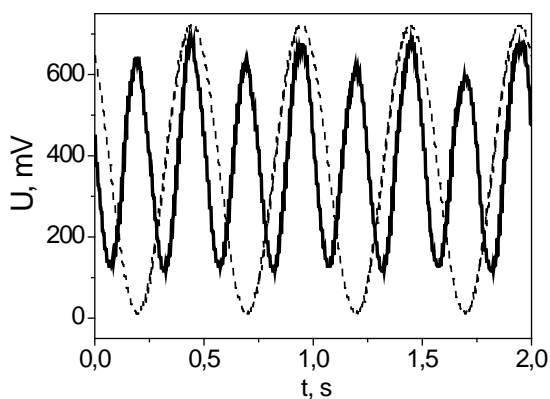


Рис. 2. Типові осцилограми сигналів фотодіода (суцільна лінія) та модулюючої напруги на п'єзоелементі (пунктир) у схемі, показаній на рис. 1.

У випадку наявності одного домінуючого типу носіїв заряду при формуванні ФР ґратки інтенсивність  $I_s(d)$  досягає насичення з певним характерним часом, проте у випадку присутності так званої компенсуючої ґратки,

викликану або фотоіндукованими носіями заряду протилежного знаку, або екрануванням поля просторового заряду, дана залежність є більш складною, і в цьому випадку крива росту  $I_s(d)$  описується наступним видом часової залежності коефіцієнта  $\Gamma$ :

$$\Gamma(t) = \Gamma_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right] + \Gamma_2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right], \quad (2)$$

де  $\tau_1, \tau_2$  – характерні часи релаксації для вказаних двох внесків, а  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – їх внески до сумарного значення.

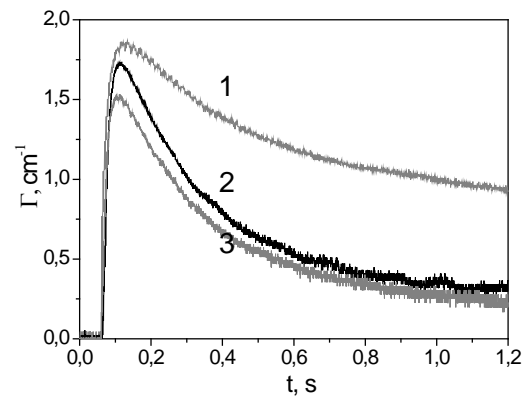


Рис. 3. Часова залежність коефіцієнта двохвильової взаємодії  $\Gamma$  при взаємодії променів, виміряна в різних точках кристала.

На рис. 3 приведено криві, одержані у досліджуваному зразку шляхом вимірювання динаміки коефіцієнта двохвильової взаємодії  $\Gamma$  при стаціонарній взаємодії, тобто без модуляції фази лазерного випромінювання. Різні криві відповідають перетину взаємодіючих променів у різних точках кристала, вибраних вздовж осі Y. Видно, що спостерігається значний ефект компенсації, і характер кривих відповідає залежності типу (2). Це свідчить, що атоми Cu, продифундовані в об'єм зразка, суттєво впливають як на амплітудні характеристики, так і на динаміку ФР ефекту. На рис. 3 точка 1 відповідає найменшій концентрації домішки Cu, точка 3, відповідно, найбільшій, і це корелює з мірою компенсації коефіцієнта підсилення сигнального променя. Подальші частотні дослідження проводились в точці 2, що відповідає центральній області кристала. На рис. 4 показано частотні залежності, отримані шляхом фур'є-аналізу сигналу фотоприймача, отриманих при різ-

них частотах  $f$  коливань п'єзоелемента. Форма та амплітуда сигналу залежать від частоти і амплітуди фазової модуляції. У змінній складовій інтенсивності вихідного променя домінує подвоєна частота модуляції фази, що відповідає ситуації, очікуваній при дифузійному механізмі ФР ефекту [2, 3]. Однак також наявна і перша гармоніка, що може вказувати, зокрема, на можливу наявність незміщеної по відношенню до інтерференційної картини фазової ґратки, тобто локальної компоненти ФР ефекту. Відзначимо, що перша гармоніка, яка спостерігається в аналогічних експериментах з кристалами  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  легованих  $\text{Sb}$ , є набагато інтенсивнішою [3]. При цьому в тривалих експериментах їх відносні вклади періодично змінюються, що може свідчити про конкуренцію двох механізмів, локального та нелокального, у формування ФР ґратки.

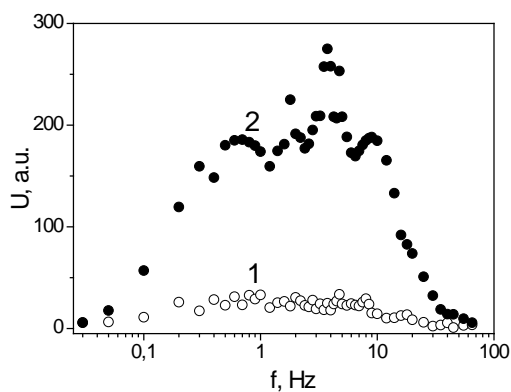


Рис. 4. Частотні залежності інтенсивностей першої (1) та другої (2) гармонік осцилограм, одержаних при амплітуді коливань п'єзоелемента 0,15 мкм.

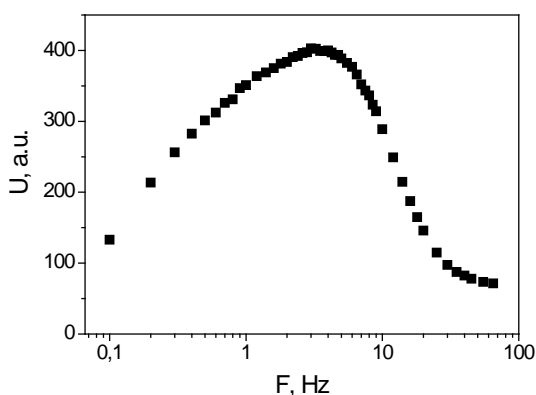


Рис. 5. Частотна залежність постійної складової осцилограм.

Відзначимо, що експерименти з фазовою модуляцією формування ФР ґраток можуть бути використані як інформативний метод

дослідження складної динаміки ФР ефекту. Як видно з рис. 5, на якому виділена постійна складова на частотній залежності осцилограм, її характер відповідає кривим часової динаміки коефіцієнта  $\Gamma$ : на кривій  $\Gamma(t)$  пік спостерігається в області  $t = 0.1..0.2$  с, що відповідає максимуму на кривій залежності стаціонарної компоненти при  $f \sim 5$  Гц, тобто "часове" і "частотне" представлення спектра  $\Gamma$  загалом корелюють в нашому випадку.

Такий складний вид спектра голографічного підсилення дозволяє запропонувати, на додаток до "відрізаючих" фільтрів частот, що реалізуються у класичному випадку динамічного інтерферометра з ФР кристалом, "смуговий" фільтр, що може бути реалізований на основі модифікованих ФР кристалів з вираженим ефектом компенсації. Оскільки міру компенсації можна до певної міри контролювати вибором режимів термодифузії та типу легуючого елемента, це відкриває нові можливості для одержання заданих параметрів динамічних інтерферометрів для різних задач.

## Висновки

Реалізовано схему динамічного інтерферометра на основі кристала  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ , модифікованого термодифузійною атомів міді. Даний кристал демонструє складний механізм ФР ефекту, що характеризується компенсацією ґраток просторового заряду. Виявлено вплив концентрації домішок на коефіцієнт двохвильової взаємодії. Проаналізовано частотні характеристики інтерферометра в діапазоні частот 0.1...100 Гц. Показано, що дана схема може використовуватись в якості смугового частотного фільтра, а також як метод дослідження складної динаміки фізичних процесів при формуванні ФР ґраток просторового заряду.

Робота виконана при підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень, проект № 23914.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kamshilin A. A., Romashko R. V., Kulchin Y. N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // *Journ. Appl. Phys.* – 2009. – Т. 105. – №. 3. – С. 031101.
2. Цигика М.В., Стойка І.М., Грабар О.О. Динамічний інтерферометр на основі фоторефрактивного ефекту в кристалі  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ // Науковий вісник Ужгородського університету. Сер.: Фізика. – 2014.– № 35.– С. 74-78.
3. Grabar A., Mathey P., Tsyhyka M., Gadret G., Stoika I. Dynamic Holographic Interferometry with Doped  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  Photorefractive Crystals // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017.– V. 867. – P. 012027.
4. Grabar A., Jazbinsek M., Shumelyuk A., Montemezzani G., Vysochanskii Yu., Gunter P. Photorefractive effects in  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ .– In: *Photorefractive Materials and Their Applications. Vol. 2. Materials.* – Springer Series in Optical Sciences, V. 114. – 2006. – 454 p.
5. Kedyk I.V., Matthey P., Gadret G., Bidault O., Grabar A. A., Fedyo K.V., Stoika I. M., Prits I. P., Vysochanskii Yu. M. 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.– V. 92. – №4.– P. 549-554.

Стаття надійшла до редакції 3.04.2017

М. В. Цигика, А. А. Когутич, І. І. Стойка, А. А. Грабар  
Ужгородский национальный университет, ул. Волошина, 54, 88000, Ужгород  
e-mail: al\_grabar@hotmail.com

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР НА ОСНОВЕ ФОТОРЕФРАКТИВНОГО КРИСТАЛЛА $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ МОДИФИЦИРОВАННОГО ДИФФУЗИЕЙ $\text{Cu}$

На основе фоторефрактивных параметров модифицированных термодиффузией атомов меди монокристаллов  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  реализован двухлучевой динамический интерферометр. Показано, что частотный спектр коэффициента голографического усиления в данных кристаллах имеет максимум в результате процессов компенсации. Получены частотные характеристики такого интерферометра.

**Ключевые слова:** динамический интерферометр, фоторефрактивный эффект, двухволновое взаимодействие, фазовая модуляция, тиогиподифосфат олова.

PACS 07.60.Ly, 42.40.Kw, 78.20.Mg

DOI: 10.24144/2415-8038.2017.41.14-19

M. V. Tsygyka, A. A. Kohutych, I. I. Stoika, A. A. Grabar

Uzhhorod National University, Voloshin st. 54, 88000, Uzhhorod

e-mail: alexander.grabar@uzhnu.edu.ua

## DYNAMIC INTERFEROMETER ON THE BASE OF $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ PHOTOREFRACTIVE CRYSTAL MODIFIED BY INDIFFUSION OF Cu

**Introduction:** The photorefractive parameters of the  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  single crystals modified by different ways (doping, post-growth treatment) permit to realize the dynamic interferometers. A specific interest represent the samples with strong compensation process.

**Purpose:** This article is devoted to consideration of usage of the  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  crystal modified by an indiffusion of the Cu atoms as an active element of the dynamic interferometer, and analyzing of its frequency parameters.

**Results:** The diffusion-modified  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  sample demonstrates an increased compensation of the photorefractive gratings that manifests itself in the complex dynamics of the stationary energy transfer. This peculiarity is also observed in the frequency spectra measured at the phase modulation of the interacting beams. These frequency spectra of the first and second harmonics, as well as the corresponding stationary component, are obtained and analysed.

**Conclusion:** The dynamic interferometer on the basis of the Cu-doped  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  with strong gain compensation allows to construct the band-pass frequency filters, and also to study the two-wave mixing gain spectrum using frequency-modulation technique.

**Keywords:** dynamic interferometer, photorefractive effect, two-wave mixing, phase modulation, tin thiohypodiphosphate.

PACS NUMBER: 07.60.Ly, 42.40.Kw, 78.20.Mg

### REFERENCES

1. Kamshilin, A. A., Romashko, R. V., Kulchin, Y. N. (2009), "Adaptive interferometry with photorefractive crystals", *Journ. Appl. Phys.*, T. 105, № 3, pp. 031101.
2. Tsyhyka, M.V., Stoika, I.M., Grabar, A.A. (2014), "Dynamic interferometer based on photorefractive effect in the crystal  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ " ["Dynamichnyj interferometr na osnovi photorefraktyvnoho efektu v kristali  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ "], *Visnyk Uzhhorod Univ. Ser. Phys.*, No. 35, pp. 74-78.
3. Grabar, A., Mathey, P., Tsyhyka, M., Gadret, G., Stoika, I. 2017, "Dynamic Holographic Interferometry with Doped  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  Photorefractive Crystals", *J. Phys.: Conf. Ser.*, V. 867, pp. 012027.
4. Grabar, A., Jazbinsek, M., Shumelyuk, A., Montemezzani, G., Vysochanskii, Yu., Gunter, P. 2006, *Photorefractive effects in  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ , Photorefractive Materials and Their Applications. Vol. 2. Materials, Springer Series in Optical Sciences*, V. 114, 454 p.
5. Kedyk, I.V., Mathey, P., Gadret, G., Bidault, O., Grabar, A. A., Fedyo, K.V., Stoika, I. M., Prits, I. P., Vysochanskii, Yu. M. 2008, "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*, V. 92, №4, pp. 549-554.