

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**

**Олійник Остап Олегович**

**УДК 621.3.082.55, 535.568, 531.713.8**

**ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ МІКРОСКОПУ НЕСТАЦІОНАРНОЇ  
ФОТОПРУЖНОСТІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОНІКИ**

**Спеціальність 05.27.01 – Твердотільна електроніка**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електронних приладів та пристроїв Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, професор  
**Циганок Борис Архипович**,  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського",  
професор кафедри електронних приладів та пристроїв

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Осінський Володимир Іванович**  
ДП "Науково-дослідний інститут мікроприладів" НТК  
"Інститут монокристалів" НАН України, Центр  
оптоелектронних технологій, директор

кандидат фізико-математичних наук  
**Кузьміч Андрій Григорович**  
НДЛ Фізики матеріалів твердого тіла,  
КНУ ім. Тараса Шевченка, старший науковий співробітник

Захист відбудеться "27" червня 2017 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.002.08 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського" за адресою: 03056, м.Київ, вул. Політехнічна, 16, ауд. 412

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий "26" травня 2017 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент



В.Г. Артюхов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** Сучасні мікро-, нанорозмірні матеріали та вироби з них на етапах створення та технологічної обробки можуть називатися інтегральних фізичних, хімічних та біологічних впливів. Їх реєстрація та контроль на молекулярному та атомарному рівнях дає можливість створювати електронні функціональні пристрої та системи в єдиному технологічному циклі. Це створює необхідність розробки, створення та виготовлення нових приладів та пристроїв для неруйнівних методів контролю мікронапружень, якості внутрішньої структури та поверхні матеріалів електроніки, фотоніки, оптоелектроніки, біоелектроніки та цілого ряду інших міждисциплінарних галузей сучасної науки та техніки [1, 3, 5, 6].

На сьогодні є цілий ряд ефективних та широко розповсюджених оптичних, рентгенівських, фотоакустичних та ультразвукових методів неруйнівного контролю. Їх принципи реєстрації дефектів здебільшого полягають у зміні енергетичних параметрів випромінювання для побудови тінювого зображення, що при дослідженні надтонких та малорозмірних об'єктів згаданими методами не дає чітких результатів через обмеження чутливості, а також зростання кількості шумових та дестабілізуючих факторів в процесі вимірювання [10, 12].

Більш ефективне вирішення задач підвищення чутливості вимірювання існуючих методів, які мають справу з амплітудою, фазою та частотою, може бути знайдене шляхом реєстрації зміни у просторі і часі комплексного показника заломлення досліджуваних матеріалів. Окрім цього задачі відокремлення корисного сигналу від шумових факторів методом поляризаційної модуляції в режимі реального часу вимагає додаткових досліджень [10, 15, 16]. Проблема прецизійного вимірювання різниці фаз між сигналами з високою чутливістю та роздільною здатністю існує не лише в модуляційній поляриметрії [4, 13, 14]. Актуальним є синтез оптимальних фільтрів для реєстрації фазового зсуву між ортогональними компонентами лінійного та циркулярного стану поляризації [10,17].

Актуальність даної дисертаційної роботи, яка передбачає дослідження перерахованих вище науково-технічних задач, пов'язана з нагальною потребою у нових ефективних засобах неруйнівного контролю діелектричних властивостей матеріалів напівпровідникової електроніки. В основу розробленого інструментарію була закладена методика модуляції стану поляризації, яка полягає у тому, що енергія зонduючого випромінювання, його хвильовий вектор, загальна фаза та частота залишаються незмінними, тоді як модуляції підлягають амплітуди та фази ортогональних складових поляризованого випромінювання. Таким чином, розробка приладу на основі даного методу модуляції дає змогу вимірювати з високою чутливістю та малою похибкою всі чотири компоненти вектора Стокса в режимі реального часу та аналізувати окремо лінійну, циркулярну, лінійну під кутом  $45^\circ$  та повну інтенсивність зонduючого випромінювання. Особливої уваги вимагає вирішення проблем флуктуації параметрів досліджуваних матеріалів не лише у просторі, а й у часі. Аналіз параметрів поляризації щодо їх інформаційної здатності та методів їх вимірювання став підґрунтям у створенні приладу для реєстрації нестационарного фотопружного ефекту, що виникає внаслідок фізичного, хімічного чи біологічного впливу на матеріали електроніки. Наслідок цього впливу у технологічних процесах у вигляді зміни поляризаційних властивостей досліджуваної області матеріалу дозволяє зі змін амплітуди та фази зонduючого випромінювання визначати величину та знак поверхневого та внутрішнього механічного напруження [1-17].

Аналіз сучасної науково-технічної літератури також свідчить про актуальність не лише методик прецизійних вимірювань механічних напружень в статичі, але й розробок

нових методик та засобів запобігання виникнення дефектів шляхом неперервного контролю структури матеріалу та його реакції на нестаціонарний зовнішній вплив.

Актуальність роботи пов'язана як з необхідністю розвитку теоретичної бази модуляційної поляриметрії, так і з розробкою нового фотопружного мікроскопу [7], боротьби з дестабілізуючими факторами [2]. На основі розробленого принципу реєстрації різниці фаз між ортогональними компонентами лінійно поляризованого випромінювання реалізовано новий метод та пристрій для вимірювання надмалих переміщень з високою просторовою роздільною здатністю, чутливістю та точністю [8, 9, 14].

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі електронних приладів та пристроїв Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” у відповідності до держбюджетної роботи: «Дослідження фізичних, технологічних та інформаційних засад створення електронних приладів, пристроїв та систем», державний реєстраційний №0112U005032. Напрямок досліджень пов'язаний з науковою тематикою кафедри електронних приладів та пристроїв і її навчальними дисциплінами, а саме «Оптоелектроніка», «Функціональна електроніка», «Вимірювання в електроніці», «Електронні системи», та з Державною цільовою науково-технічною програмою “Розроблення і створення сенсорних наукоємних продуктів на 2008—2017 роки” (Розроблення і створення засобів реєстрації деформації в компонентах електронних приладів, непрозорих матеріалах та механічних конструкціях). У виконанні згаданих тем та програм автор брав безпосередню участь.

### **Мета і задачі дослідження:**

Вдосконалення модуляційно-поляризаційного методу реєстрації механічних напружень шляхом підвищення чутливості вимірювання наведеного нестаціонарними процесами двопротенезаломлення в матеріалах електроніки. Моделювання та реалізація фотопружного мікроскопу на основі досліджень нестаціонарної фотопружності в матеріалах електроніки для вимірювання в них величини двопротенезаломлення та розрахунку на цій основі приповерхневих та внутрішніх механічних напружень; застосування фотопружного мікроскопу для вимірювання механічних переміщень еталонних зразків з градаційними змінами показників заломлення, створення на їх основі сенсорів надмалих переміщень.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Проведення аналізу та систематизація схем приладів, які використовують модуляцію стану поляризації випромінювання на основі ефекту фотопружності: обґрунтування вибору оптимального розташування оптичних, електронних елементів та досліджуваних зразків для підвищення чутливості вимірювання двопротенезаломлення.

2. Проведення теоретичного аналізу перетворення стану поляризації вхідного лазерного випромінювання в оптичних елементах приладу, що базується на використанні квадратних матриць Максвелла-Джонса та векторів Стокса, а також моделювання фотопружних процесів в матеріалах електроніки.

3. Розвиток в лінійному наближенні математичної моделі нестаціонарного двопротенезаломлення, індукованого градієнтом температури для дослідження наведених ним локальних механічних напружень в зразках кристалів, напівпровідникових матеріалах, багатoshарових та композитних зразках у вигляді пластин.

4. Експериментальне дослідження стохастичних параметрів нестаціонарної фотопружності в твердих тілах при значних величинах показника поглинання і низької теплопровідності, а також аналіз практичної можливості використання фотопружності для діагностики тонких плівок або поверхонь оптично непрозорих матеріалів електроніки на

довжині поглинання.

5. Відштовхуючись від визначених умов, при яких нестационарна фотопружність має властивість ергодичності, провести дослідження поверхневих та об'ємних нестационарних фотопружних процесів в твердих тілах з урахуванням їх форми та взаємодії з навколишнім середовищем для поліпшення математичної моделі нестационарного двоприменезаломлення, що дає змогу врахувати шумові та дестабілізуючі фактори в процесі вимірювання, а також дає можливість знайти шляхи підвищення чутливості вимірювання величини двоприменезаломлення.

6. На основі розв'язків попередніх задач – синтез оптимального фільтру з врахуванням особливостей модуляції стану поляризації випромінювання та підвищеною граничною чутливістю вимірювання фазового зсуву між ортогональними складовими електромагнітної хвилі.

7. Розробка фізико-топологічної моделі та практична реалізація однієї з можливих модифікацій фотопружного мікроскопу для дослідження нестационарних механічних напружень в матеріалах та виробках електронної техніки. Створення сенсору надмалих переміщень на основі градаційного розподілу фотопружності вздовж однієї із осей еталонного зразку. (В якості досліджуваних зразків – матеріали, які широко використовуються у виробках електронної техніки та інших застосуваннях).

*Об'єкт досліджень* – малорозмірні фотопружні поверхневі та об'ємні локальні елементи твердих тіл, що знаходяться в стаціонарному та нестационарному стані, які можуть бути зареєстровані методами модуляції стану поляризації лазерного випромінювання.

*Предмет досліджень* – нестационарна анізотропія діелектричних властивостей, яка полягає в наведеному лінійному двоприменезаломленні та його залежності від параметрів матеріалу, його геометричних розмірів та дестабілізуючих факторів навколишнього середовища або технологічної обробки.

**Методи досліджень.** Використання математичного апарату з розв'язку рівняння Пуассона та диференціальних рівнянь коливань для аналізу розподілу механічних напружень в матеріалах електроніки. Застосування матричного методу Максвелла-Джонса та векторного методу Стокса для поляриметричного аналізу складу та структури досліджуваних матеріалів. Застосування методу модуляційної поляриметрії для дослідження оптоелектронних, поляризаційних та фізичних властивостей нестационарного фотопружного стану матеріалів електроніки, визначення надмалих зміщень, внутрішніх мікронапружень. Комп'ютерне та математичне моделювання для аналізу експериментальних результатів та синтезу оптимального фільтру сигналу, який містить інформацію про амплітуду, частоту, фазу та параметри стану поляризації.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Вперше для підвищення чутливості вимірювання двоприменезаломлення встановлені та обґрунтовані параметри математичної моделі твердого тіла з фотопружними властивостями, яка відрізняється тим, що враховується ряд дестабілізуючих факторів в лазері, середовищі поширення випромінювання, фотоприймачі, а також спроектований оптимальний фільтр з урахуванням спектральних характеристик модульованого сигналу.

2. Вперше для реєстрації нестационарної фотопружності створено фізико-топологічну та математичну модель приладу для вимірювання зміни стану поляризації, що на відміну від існуючих моделей дозволяє розрахувати відношення сигнал/шум в залежності від амплітуди вхідного сигналу, часу вимірювання (інтегрування), коефіцієнту модуляції лазерного випромінювання та спектру корисного сигналу.

3. На основі математичної моделі наведеної фотопружності вперше розкриті фізичні причини еволюції деформаційних хвиль стиснення-розтягнення при поширенні від поверхні вглиб досліджуваних матеріалів з нульовим коефіцієнтом температурного розширення. Показано, що знакосталі та знакозмінні області механічної деформації можуть бути розраховані з одного вихідного рівняння балансу енергій. Конкретизовані початкові та граничні умови, а також параметри математичної моделі нестационарної фотопружності з урахуванням моделі похибок, яка підтверджена експериментальними результатами.

4. Вперше розроблено математичну модель фотопружного мікроскопу з підвищеною чутливістю для вимірювання нестационарної зміни оптичних та механічних параметрів твердого тіла в фокусі лазерного променя в режимі реального часу, яка на відміну від аналогів дозволяє розраховувати відношення сигнал/шум та граничну чутливість до зміни стану поляризації, а також розраховані параметри сканування області твердого тіла растровим методом, який запобігає пропуску неоднорідності в процесі сканування при відомих параметрах скануючого променя чи плями.

5. На основі отриманих теоретичних розрахунків нестационарної фотопружності та пристроїв для її реєстрації вперше практично реалізована одна із можливих модифікацій фотопружного мікроскопу, на яку отримано патент на корисну модель. Завдяки експериментально встановленим співвідношенням на фотопружному мікроскопі були розроблені та запатентовані як корисні моделі – сенсори надмалих зміщень, які на відміну від існуючих, дозволяють проводити градаційне вимірювання механічного переміщення без заміни еталонного зразку, а лише завдяки регулюванню граничної чутливості вимірювання двоприменезаломлення.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Практично продемонстровано, що модуляція стану поляризації випромінювання дозволяє поліпшити виявну здатність по відношенню до анізотропії діелектричних властивостей в порівнянні з традиційними методами поляризаційної мікроскопії. Теоретично та експериментально підтверджена залежність величини корисного сигналу від геометричних розмірів, форми матеріалу, а також умов вимірювання. Показано, що максимальна виявна здатність по відношенню до відносної зміни показника заломлення  $\Delta n/n$  досягає  $10^{-12}$ , що відповідає границі вимірювання фазового зсуву  $2\pi \cdot 10^{-8}$  рад з похибкою до 20% (відповідає вихідному сигналу синхронно-фазового детектора 10 нВ), при проходженні через зразок товщиною 10 мм.

2. Побудований експериментальний зразок приладу на основі модуляційної поляриметрії для фотопружної мікроскопії анізотропних властивостей твердих тіл в нестационарному режимі, в режимі пропускання та у відбиванні випромінювання;

3. Показано, що на основі використаного методу модуляційно-поляризаційної діагностики можуть бути створені прилади та пристрої контролю однорідності діелектричних та оптичних властивостей матеріалів та виробів (кристалів, полімерів, багат шарових структур, композитних матеріалів, фотонних кристалів, пристроїв на поверхневих акустичних хвилях), а також пристрої неруйнівної діагностики розподілу дефектів та домішок в кристалах;

4. На основі модуляції стану поляризації лазерного випромінювання розроблено новий спосіб створення високочутливих сенсорів теплових хвиль, надмалих механічних переміщень в межах мікронного та субмікронного діапазонів, а також нова архітектура фотопружного мікроскопу (патент), яка дозволила підвищити чутливість вимірювання механічних напружень до  $10 \text{ нВ} \cdot \text{см}^2/\text{г}$  при просторовій роздільній здатності 150 нм. Застосування

фотопружної мікроскопії дозволило зареєструвати та дослідити механічні напруження в Si-Al та  $\text{LiNbO}_3$ -Al мікроелектронних структурах.

**Особистий внесок здобувача.** Список наукових праць дисертанта, в яких викладено основні результати дисертаційної роботи, наведено в списку літератури. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить теоретичний аналіз, розробка моделі, виготовлення та експериментальне дослідження зразків, розробка структури фотопружного мікроскопу та його технічна реалізація, аналіз одержаних результатів та написання статей.

Автором особисто запропоновані і опубліковані:

- формули для розрахунку коефіцієнту передачі фотопружного ефекту [10];
- формули для визначення відношення сигнал/шум при модуляційній поляриметрії з використанням фотопружного модулятора [1, 3, 16];
- структура фотопружного мікроскопу та його система параметрів, практична реалізація однієї з можливих модифікацій для реєстрації відносної зміни показника заломлення на основі теоретичних розрахунків [1, 3-5, 8, 10, 11].
- результати практичного застосування нового фотопружного мікроскопу для вимірювання нестационарних механічних напружень в мікроелектронному сенсорі тиску, MEMS структурі, лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях [4, 5, 11];
- метод підвищення чутливості вимірювання величини двопронезаломлення за рахунок синтезу оптимального фільтру та синхронно-фазової реєстрації сигналу [1].
- новий метод вимірювання надмалих переміщень з використанням фотопружного мікроскопу [9, 15, 16].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях, у тому числі і міжнародних за межами України (ISSE), наукових семінарах кафедри Електронних приладів та пристроїв КПП ім. І. Сікорського:

- Науково-практичній конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», Київ, 2010;
- Науково-практичній конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», Київ, 2012;
- V Міжнародна науково-технічній конференції молодих вчених "Електроніка-2012", Київ, 2012;
- Науково-практичній конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», Київ, 2014;
- Науково-практичній конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», Київ, 2016;
- 34th International Spring Seminar on Electronics Technology "New Trends in Micro/Nanotechnology", HIGH TATRAS, SLOVAKIA, 2011;
- 35th International Spring Seminar on Electronics Technology "Power Electronics", Bad Aussee, Austria, 2012;

Наукових семінарах кафедри «Електронні прилади та пристрої» Факультету електроніки КПП ім. І. Сікорського.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 – у інших виданнях, 3 патенти на корисні моделі, 3 статті у матеріалах міжнародних конференцій, 5 статей у матеріалах конференцій, які додатково відображають наукові результати дисертації.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів із висновками, загальних висновків, списку використаних джерел із 135 найменувань на 14

сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 165 сторінок. Робота містить 33 рисунка та 7 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні задачі досліджень, приведені основні наукові результати та їх практичне значення. Визначено особистий внесок автора та надана інформація про апробацію результатів роботи, а також її зв'язок з науковими темами та програмами.

**У першому розділі** ґрунтовно розглянуті методи та засоби фотопружної поляриметрії твердих тіл. Проведена систематизація основних поляризаційних ефектів в твердому тілі для знаходження спільних та відмінних рис у їх впливі на двоприменезаломлення для подальшого використання при конструюванні приладів. Окрема увага присвячена фотопружному та термопружному ефектам, які в даній роботі є найбільш інформативними, а також розглядається термофотопружний ефект як окремий випадок.

Згідно опублікованих даних були виокремлені актуальні проблеми впливу дефектів на кристалічні та полімерні структури і виготовлених на їх базі приладів. У зв'язку з цим акцентоване питання утворення та контролю дефектів в кристалах та напівпровідникових матеріалах в процесі проведення технологічних операцій та їх вплив на характеристики електронних приладів, що представляє великий практичний інтерес і одну з першочергових задач мікро-, та наноелектроніки.

Враховуючи обмежені можливості еліпсометрії, поляриметрії та поширених засобів вимірювання внутрішніх та поверхневих механічних напружень був розглянутий метод модуляційної поляриметрії, який базується на реєстрації надмалих різниць фаз між ортогональними компонентами випромінювання. Отримані аналітичні рівняння, з яких можна отримати інформацію про величину еліптичності поляризації випромінювання з амплітуди вимірного сигналу, а про орієнтацію еліпсу – з його фази.

Розглянуті сучасні методи вирішення задач реєстрації, візуалізації та вимірювання нестационарного двоприменезаломлення (фотопружності). Аналіз недоліків методів та засобів мікроскопії, які здатні фіксувати двоприменезаломлення з надвисокою роздільною здатністю дозволив виділити наступні методи: модуляційна інтерференційна мікроскопія, модуляційно-поляризаційна мікроскопія ближнього поля та фотопружна мікроскопія. Розвитку та вдосконаленню останньої і присвячена дана дисертаційна робота, оскільки вона дає можливість дослідження кінетики індукованих поверхневих та об'ємних механічних напружень, розподілу температури в часі та просторі.

Приведений в розділі аналітичний огляд науково-технічної літератури стосовно поляризаційних ефектів, які проявляються під дією фізичних, хімічних, біологічних явищ та викликають наведене двоприменезаломлення, демонструє широкий спектр їх застосування у дефектоскопії, поляриметрії та мікроскопії, а також свідчить про великий інтерес до пошуку нових методів візуалізації малорозмірних анізотропних об'єктів та встановлення їх оптичних, механічних характеристик та геометричних розмірів. На основі проведеного огляду та аналізу сучасних проблем поляриметрії показана необхідність комплексного теоретичного дослідження нового підходу до фотопружної мікроскопії та практичної реалізації нового фотопружного мікроскопу, що дає змогу досліджувати малорозмірні анізотропні об'єкти та визначати їх оптико-механічні параметри на основі високої виявної здатності методу модуляції стану поляризації в режимі реального часу.

Зокрема обґрунтовано, що висока інформативність методу пов'язана з можливістю реєстрації фазової та амплітудної анізотропії у випадку лінійного та циркулярного



двопроменезаломлення і дихроїзму. Ця обставина дає вісім параметрів для описання зміни зонduючого лазерного випромінювання, аналіз котрих з допомогою модуляції стану поляризації та синхронно-фазовому детектуванню дозволили підвищити чутливість вимірювання зміни показника заломлення та поглинання, що в свою чергу дає змогу якісно оцінити внутрішню структуру, топологію поверхні та вимірювати оптичну анізотропію в досліджуваних матеріалах.

У другому розділі проведений аналіз методики вимірювань стану поляризації та описані методики модуляції стану поляризації з використанням фотопружного модулятора, який є частиною активної чвертьхвильової фазової пластинки. Визначені задачі теоретичного та експериментального дослідження. Отримані рівняння для розрахунку фазового зсуву між ортогональними компонентами лазерного випромінювання в залежності від електро-акустичних параметрів матеріалу фотопружного модулятора та його геометричних розмірів. Описана його робота в чвертьхвильовому та півхвильовому режимах, особливістю яких є те, що енергія електромагнітної хвилі, його хвильовий вектор, загальна фаза та частота залишаються незмінними, тоді як модулюються амплітуди і фази ортогональних складових вектору напруженості електричного поля. В результаті врахування всіх відзначених обставин в даній роботі була використана активна чвертьхвильова фазова пластинка, яка забезпечує максимальну глибину модуляції (сягає 99%).

Розроблена методика реєстрації нестационарного фотопружного ефекту, індукованого неоднорідним тепловим полем, яке і створює умови виникнення двопроменезаломлення через генерацію внутрішніх механічних напружень та зміну геометричних розмірів зразка.

Проведені прицельні вимірювання різниці фаз між ортогональними компонентами лазерного випромінювання з використанням існуючих синхронно-фазових детекторів з часом накопичення сигналу 30-100 с, що дозволило досягнути граничну чутливість вимірювання  $2\pi \cdot 10^{-6}$  [рад] з похибкою 25 %.

Для дослідження властивостей стаціонарної («замороженої») та нестационарної фотопружності в оптичнопрозорих матеріалах була запропонована наступна структура експериментальної установки, яка показана на рис. 1.:

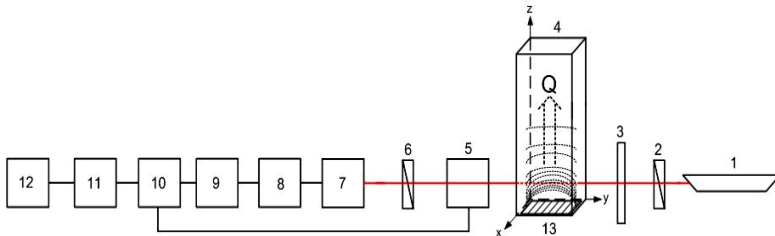


Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки для дослідження властивостей нестационарного термо-фотопружного ефекту. Де 1 – гелій-неоновий лазер з довжиною хвилі 633 нм, 2 – поляризатор, 3 – чвертьхвильова фазова пластинка, 4 – досліджуваний зразок, 5 – фотопружний модулятор, 6 – аналізатор, 7 – фотоприймач, 8 – селективний нановольметр, 9 – атенуатор, 10 – синхронно-фазовий детектор, 11 – АЦП, 12 – персональний комп'ютер, 13 – генератор детермінованих теплових імпульсів енергією  $Q=1\pm5\%$  Дж.

Закладений принцип роботи установки полягає в наступному: поляризоване випромінювання з джерела 1 пропускається через поляризатор Аренса 2 для максимальної поляризації випромінювання. При проходженні через зразок 4 в залежності від його геометрії

та оптичних параметрів лазерне випромінювання змінює свою фазу на величину  $\Delta$ , яке фіксує аналізатор 6. Причому:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_{\perp} - n_{\parallel}) = \frac{2\pi}{\lambda} d(n^{-} - n^{+}) \quad (1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі лазера,  $d$  – товщина зразка,  $(n_{\perp} - n_{\parallel})$ ,  $(n^{-} - n^{+})$  – різниця між ортогональними компонентами оптичної індикатрисы зразка для лінійної та циркулярної поляризації відповідно. Роль активної фазової пластинки грає чвертьхвильова фазова пластинка 3 та фотопружний модулятор 5. Після аналізатора поляризоване випромінювання спрямовується на фотоприймач 7, сигнал з якого подається на вхід селективного нановольтметра 10, настроєного на резонансну частоту модулятора (або подається опорний сигнал з генератора фотопружного модулятора). Сигнал величиною до одиниць мікровольт на вході селективного нановольтметра підсилюється до одного вольту та через 12-и розрядний АЦП 11 подається на персональний комп'ютер 12 через COM-порт або USB. Симуляція нестационарного термодинамічного процесу відбувається завдяки імпульсному нагріву тонкоплівкового резистора 13, який через імерсійну рідину передає тепловий імпульс в зразок через тепловий контакт. Такий тепловий імпульс викликає в матеріалах перехідні термодинамічні процеси, які є нестационарними.

Після подачі електричного імпульсу тривалістю 10 мс на тонкоплівковий резистор, він генерував відповідний тепловий імпульс. Тепло, перейшовши в зразок, генерує в ньому градієнт температури, який можна представити у вигляді:

$$\Delta T = -\frac{\alpha T}{\rho C_p} \Delta \sum_{i=1,2,3,\dots} \sigma_i \quad (2)$$

де  $\Delta T$  – зміна температури матеріалу в межах лазерного променя,  $\alpha$  – коефіцієнт температурного розширення матеріалу,  $\rho$  – густина матеріалу,  $C_p$  – константа фотопружності,  $T$  – абсолютна температура зразка, і  $\Delta \sum_{i=1,2,3,\dots} \sigma_i$  – зміна суми елементарних

внутрішніх напружень  $\sigma_i$ . Задача значно спрощується методично, оскільки компонента  $\Delta \sum_{i=1,2,3,\dots} \sigma_i$  має пряме відношення до коефіцієнтів тензору деформації, сумарний вплив яких на оптичні характеристики проявляється через зміну тензора показника заломлення, а отже зміну величини двопроменезаломлення  $\Delta n = (n_{\perp} - n_{\parallel})$ , проінтегровану по площі плями лазерного променя та товщині зразка  $d$ . Величина циркулярної компоненти пройденого через зразок випромінювання складає  $I_V \approx \sin(\varphi)\sin(\omega t)$ , де  $\varphi = \varphi_x - \varphi_y = 2\pi\lambda^{-1}d(n_{\perp} - n_{\parallel})$  і є безпосередньо мірою внутрішніх та поверхневих механічних напружень.

Розроблена фізико-математична модель пристрою для реєстрації нестационарної фотопружності. Оскільки в початковому стані випромінювання вважається повністю поляризованим (лінійно або циркулярно), був використаний для його описання формалізм матриць Джонса. В результаті розрахунків отримано рівняння, яке описує сигнал фотоприймача  $U_s(t)$  в залежності від параметрів випромінювання та модуляції стану поляризації:

$$U_s(t) = \frac{I_0 S_{\lambda}}{8} \left[ a_1 m_m k_m 10^{-RIN/130} - \mathcal{G} + \mathcal{G}^2 \sin^2(\omega t) + 2\delta_0 \sin(\omega t) - \mathcal{G}^2 \delta_0 \sin(\omega t) \right] \quad (3)$$

У виразі (3) враховується інтенсивність лазерного випромінювання  $I_0$ , коефіцієнт поляризації лазерного випромінювання  $k_m$  та вольтова чутливість фотоприймача  $S_\lambda$ , глибина модуляції випромінювання  $m_m$ , відносний шум інтенсивності лазера  $RIN$ , величина двоприменезаломлення  $\vartheta$  внесена зразком та фотопружним модулятором  $\delta$ , частота модуляції  $\omega$ , еквівалентний коефіцієнт пропускання оптичних елементів  $a_1$ .

Розраховані похибки параметрів інтенсивності лазерного променя при фізико-математичному моделюванні, які обумовлені флуктуацією фазових параметрів фотопружного модулятора, лазера, азимутального кута і похибкою їх вимірювання:  $\Delta I_s \approx 5\%$ , для  $\Delta \theta_m = 10^{-7}$  рад,  $\Delta \delta_0 = 10^{-5}$  рад,  $\Delta \vartheta = 10^{-6}$  рад.

Врахована нелінійність відносної вольтової чутливості фотоприймача, яка максимально становить  $\Delta S_u/S_{u\_MAX} = 1\%$ . Кут  $\Omega$ , під яким випромінювання з інтенсивністю  $I_s$  фокусується на його поверхню, має відносну зміну  $\Delta \Omega/2\pi = 0,005$ . Таким чином похибка перетворення інтенсивності лазерного випромінювання  $\Delta I_s$  в електричний сигнал разом з інструментальною похибкою вимірювання селективного нановольметра  $\Delta_{np} = 15\%$  не перевищує 20%. Для підтвердження адекватності фізико-математичної моделі проведена оцінка експериментальних результатів з критерію Кохрена, яка підтвердила теоретичні розрахунки.

Проведений теоретичний аналіз та визначені спектри шумових факторів, які впливають на процес вимірювання, а саме: шум лазера, шуми фотоприймача, шум електронного підсилювача, структурний шум та вібрації при роботі крокових двигунів, шум фотопружного модулятора. Теоретичне відношення сигнал/шум розраховане з потужності сигналу та шумів складає 80 дБ. Для перевірки розрахунків описана методика вимірювання відношення сигнал/шум, яка ґрунтується на вимірюванні спектральної густини шуму та сигналу в смузі пропускання селективного нановольметра на основі ГОСТ 21815.19-90. Виміряне значення відношення сигнал/шум складає  $65 \pm 10$  дБ.

Узгодження теоретичних та експериментальних результатів підтверджує високу, у порівнянні з найближчими аналогами, виявну здатність методу модуляції поляризації по відношенню до реєстрації відносної зміни наведеного двоприменезаломлення величиною  $\Delta n/n \approx 10^{-10}$  при проходженні модельних зразків з кварцу та композитного скла товщиною 1 см. Теоретичний аналіз можливостей модуляції стану поляризації при підборі оптимальних параметрів електрооптичної схеми та режимів дає можливість отримати відношення сигнал/шум = 80 дБ, при чутливості 3 мкВ. Виміряна залежність відношення сигнал/шум установки від параметрів її елементів та складає 65 дБ, при граничній чутливості 3 мкВ.

У **третьому розділі** проведено моделювання та дослідження нестационарної фотопружності в однорідних твердих тілах. Коефіцієнт передачі фотопружного ефекту для нестационарного градієнту температури, отриманий з розв'язку рівняння Пуассона з урахуванням початкових та граничних умов:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \frac{\partial T}{D \partial t} = \frac{\lambda_T}{c\rho} \nabla^2 T = C_p \sigma \quad (4)$$

де  $D$  – коефіцієнт пропорційності;  $\lambda_T$  – коефіцієнт теплопровідності,  $c$  – теплоємність.

Граничні та початкові умови для рівняння (5) задаються товщиною зразка, за початок відліку температури приймається температура навколишнього середовища  $T_p$ , надмірна

температура стінки приймається  $T_{HC} = T_p - T_{Y,Z}$ . Граничні умови при  $Y = \pm d/2$ ,  $0 < Z < L_z$ ,  $0 < X < L_x$ , при коефіцієнті тепловіддачі  $\alpha$  мають вигляд:

$$-\frac{\partial(T_{HC} - T_Y)}{\partial Y} = \frac{\alpha}{\lambda_T}(T_{HC} - T_Y); \quad -\frac{\partial(T_{HC} - T_Z)}{\partial Z} = \frac{\alpha}{\lambda_T}(T_{HC} - T_Z); \quad -\frac{\partial(T_{HC} - T_X)}{\partial X} = \frac{\alpha}{\lambda_T}(T_{HC} - T_X) \quad (5)$$

Початкові умови при  $t=0$ :  $T_{HC} - T_{Y,Z} = T_{HC}$ .

Крайові умови для миттєвого (10 мс) джерела тепла енергією 1 Дж:  $T_{Z=0} = T(Z_0) > T_{HC}$ .

Розв'язок (5) знайдений методом розділення змінних та дозволяє знайти значення температури в кожній точці зразка з температуропровідністю  $k_T$  вздовж осі симетрії  $Z$  в довільний момент часу без врахування параметрів теплообміну з навколишнім середовищем:

$$T(Z, t) = \frac{k_T T(Z_0) L_Z}{d \sqrt{\pi t}} e^{-\frac{(L_Z^2)}{d^2 t}} \quad (6)$$

Скомбінувавши розв'язок (6) та (3) з урахуванням правої частини (5) отримано вираз для коефіцієнту передачі фотопружного ефекту  $K_{i,k}$ :

$$K_{i,k} = \sin(C_p \sigma_T + \frac{2\pi d}{\lambda} [n_{\perp} - n_{\parallel}]) \sinh(C_p \sigma_T) e^{-C_p \sigma_T} \quad (7)$$

де  $\sigma_T$  - механічні напруження, викликані нестационарними тепловими процесами.

Таким чином, розв'язок рівняння (5) знаходився з урахуванням: форми тіла; характеристичних розмірів  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $l_z$ ; теплофізичних та оптичних властивостей тіла; початкових температур тіла, його поверхні та навколишнього середовища. Для врахування взаємодії матеріалів з навколишнім середовищем використані критерії Біо  $Bi\{t, l_z\}$  та Фур'є  $F_0\{t, l_z\}$ . Для знаходження температури  $T$  в будь якій точці зразка в довільний момент часу використовується її функціональна залежність від просторових, термодинамічних та часових параметрів  $T = f(x, y, z, F_0, Bi, t)$ . Отримано систему рівнянь, яка описує появу корисного сигналу  $U(t, l_z)$  викликаного нестационарним двопротонезаломленням при поширенні теплової хвилі в точці з координатою  $l_z$  для довільного моменту часу  $t$ :

$$\left[ \begin{aligned} U(t, l_z) &= \frac{SI_0}{4} \sin(C_p \sigma_T \{t, l_z\} + \frac{2\pi d}{\lambda} [n_{\perp} - n_{\parallel}]) \times \sinh(C_p \sigma_T \{t, l_z\}) e^{-k \sigma_T \{t, l_z\}}; \\ \sigma_T \{t, l_z\} &= \frac{\lambda_T}{c \rho} \nabla^2 T(l_z, t); \\ T(l_z, t) &= A_i(F_0\{t, l_z\}, Bi\{t, l_z\}) \frac{\lambda_T T(Z_0) L_Z}{c \rho d \sqrt{\pi t}} e^{-\frac{(L_Z^2)}{d^2 t}} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

З урахуванням дестабілізуючих факторів, встановлених у Розділі 2, та виразу (8), отримано аналітичну залежність корисного сигналу, який відповідає нестационарним фотопружним процесам на виході фотоприймача:

$$U(t, l_z) = \frac{SI_0}{4} 10^{-RIN/130} a_1 m_m k_m \sin(C_p \sigma_T \{t, l_z\} + \frac{2\pi d}{\lambda} [n_{\perp} - n_{\parallel}]) \sinh(C_p \sigma_T \{t, l_z\}) e^{-C_p \sigma_T \{t, l_z\}} \quad (9)$$

З урахуванням залежностей, отриманих в Розділі 2 дисертаційної роботи, знайдено уточнений вираз для коефіцієнту передачі квазістационарного фотопружного ефекту:

$$K_{i,k} = A_i(F_0\{t, l_Z\}, Bi\{t, l_Z\})\sin(C_p\sigma_T + \frac{2\pi d}{\lambda}[n_{\perp} - n_{\parallel}])\sinh(C_p\sigma_T)e^{-C_p\sigma_T} \quad (10)$$

Експериментально підтверджені теоретичні співвідношення між виміряною напругою та величиною двопронезаломлення. Приведені рівняння описують лінійний зв'язок цих величин в межах зміни фази між ортогональними компонентами лазерного випромінювання в межах  $\pm 30^\circ$ . Це справедливо з наближенням 5% та зумовлено похибками лінійності теоретичної моделі та квазілінійною залежністю зміни величини двопронезаломлення від механічних напружень.

На рис. 2 показані результати вимірювання координатного розподілу величини двопронезаломлення в зразку композиту з нульовим коефіцієнтом теплового розширення (zerodur) при проходженні теплової хвилі вздовж координати  $Z$ . Точками позначені експериментальні дані, суцільна лінія показує теоретичний розрахунок. Кожна точка представляє середнє значення 10 вимірювань, а її висота включає в себе відхилення відносно середнього значення.

З рис. 2 видно, що поряд з достатньою кількісною узгодженістю теоретичних та експериментальних результатів (коефіцієнт кореляції 0,95 та 0,9 відповідно) існує ділянка, де вони розходяться. Причиною цьому є граничний ефект, обумовлений обмеженістю зразка. Суть його полягає в тому, що координатна функція температури біля поверхонь та всередині зразка відрізняються додатковою тепловіддачею. Цей ефект при розрахунках враховується шляхом заміни істинної температурної функції в об'ємі зразка теоретично розрахованою з  $\vartheta = (n_{\perp} - n_{\parallel}) \approx (\sigma_x - \sigma_y) \approx d^2T / dz^2$ . Подвійним інтегруванням експериментальної залежності (рис. 2) можна отримати температурну функцію  $T(z)$ .

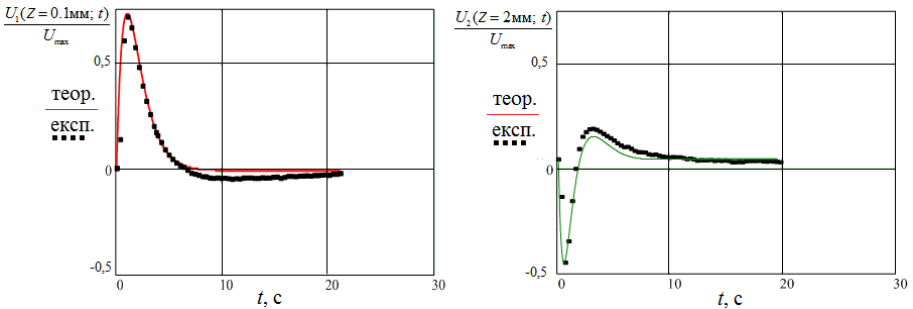


Рис. 2. Нормований сигнал реакції зразка zerodur на тепловий імпульс з енергією 1 Дж, в ближній оптичній зоні  $Z=0,1$  мм (ліворуч) та середній оптичній зоні  $Z=2$  мм (праворуч). Точками показані експериментальні дані вимірювання величини двопронезаломлення, суцільна лінія – розрахована теоретично за (8)-(10). Довірчий інтервал результатів обробки експериментальних даних з 10 замірів становить 5%.

**Четвертий розділ** присвячений використанню встановлених властивостей та параметрів нестационарного фотопружного ефекту в модельних зразках для проектування та підвищення чутливості вимірювання нестационарних механічних напружень в матеріалах електроніки з використанням розробленого фотопружного мікроскопу (ФПМ) з підвищеною чутливістю.

Розглянутий ряд модифікацій ФПМ (в залежності від розташування фотопружного модулятора) з двома способами вимірювання величини двопронезаломлення: на просвіт та у відбитому випромінюванні.

На основі проведених розрахунків в попередніх розділах практично реалізовано одну з можливих модифікацій ФПМ (рис.3.) для вимірювання нестаціонарних фотопружних процесів в твердих тілах на основі структурної схеми, показаної на рис.1.



Рис. 3. а – внутрішній вигляд ФПМ; б – блоки керування позиційною системою ФПМ, ПК та нановольтметр Unipan-232В.

Перед пошуком оптимальних методів вимірювання величини двопронезаломлення вирішена проблема переходу від нестаціонарного фотопружного (ФПЕ) та термопружного (ТПЕ) ефектів до квазістаціонарного, знайдена похибка такого переходу.

Для еквівалентного теплового шуму  $\xi(t)$  на виході фотоприймача, корисного сигналу  $U_c(t) = U[1 + \delta_0 \sin \vartheta \sin(\omega t)]$  та опорного сигналу  $U_{on}(t) = U_0 \sin \omega_0(t + \tau)$  знайдений вираз взаємкореляційної функції:

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int [U_c(t) + \xi(t)] U_{on}(t + \tau) dt = \frac{U_0 U T \delta_0 \sin \vartheta}{2} \cos \tau + \left\{ \frac{U_0 U \vartheta \delta_0}{4 \omega_0 T} [\sin \tau - \sin(\tau + 2\omega_0 T)] - \right. \\ \left. - \frac{U_0 U \vartheta \delta}{\omega_0 T} [\cos(\tau + T \omega_0) - \cos(\tau)] \right\} + \frac{U_0}{T} \int_0^T \sin \omega_0(t + \tau) \xi(t) dt \quad (11)$$

З виразу (11) видно, що другий доданок має фізичний зміст фону при кінцевому часі інтегрування, третій інтеграл описує поведінку шуму, який зменшується при збільшенні часу інтегрування  $T$ . Оцінивши дисперсію шуму, отримано остаточний вираз для відношення  $C/\Pi$  на виході блока усереднення (фільтра низьких частот):

$$\frac{C}{\Pi} \approx 20 \lg \frac{S_z I_0 \vartheta \sqrt{T}}{10 \sqrt{S_0}} = 20 \lg \frac{U_{out}}{\sqrt{U_{in}^2}} \quad (12)$$

Еквівалентний час кореляції  $\tau_{KE}$  для забезпечення максимального зменшення шумів у вихідному сигналі визначається з умов, які враховують як часові характеристики нестаціонарних фотопружних процесів в досліджуваних матеріалах електроніки, так і функцію кореляції шумів  $R_u(\tau)$ :  $\tau_{KE} \approx 0,001 R(0)$ .

Описаний метод реалізації синхронно-фазового детектора з підвищеною чутливістю для спроектованого ФПМ, який реалізує на основі виразів (11)-(12) алгоритм визначення взаємкореляційної функції (на проміжку часу  $T$ ) між корисним сигналом фотоприймача  $U_c(t)$  та опорним сигналом фотопружного модулятора  $U_{on}(t)$ .

Порівняння параметрів розробленого синхронно-фазового детектора з лабораторними вимірювальними приладами показано в Таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння параметрів використаних лабораторних приладів з розробленим синхронно-фазовим детектором для вимірювання двоприменезаломлення

Параметр	Unipan 237	UNIPAN 232B	ФПМ
Частотний діапазон	1Гц – 100кГц	1 Гц – 100 кГц	60 або 120 кГц
Похибка встановлення частоти	$\pm 1\%$	$\pm 3-5\%$	$\pm 0,01\%$
Діапазони вимірювань	1мкВ-3мкВ-10мкВ-30мкВ-100мкВ-300мкВ; 1мВ-3мВ-10мВ-30мВ-100мВ.	300нВ-30мВ	10 нВ – 1мкВ 1 мкВ – 100 мкВ 100 мкВ – 10 мВ 10 мВ – 1В
Селективність на октаву	0-25-40 дБ	40 дБ	40 дБ
Час кореляції	Швидко-повільно	1 мс – 100 с	1 мс – 30 с

Проведено дослідження характеристик та параметрів мікроскопу для ресстрації нестационарної фотопружності.

Описані вимоги узгодження глибини фокусу та товщини зразків при яких неоднорідністю діаметра променя можна знехтувати. Для контролю профілю лазерної плями та променя, можливих аберацій, візуалізації області сканування за зразком розміщений мікрометр окулярний гвинтовий із загальним збільшенням 300-600 разів, виготовлений згідно із ГОСТ 7865-56.

Розрахована нормована просторово-частотна характеристика ФПМ, яка описує залежність просторової роздільної здатності фотопружного мікроскопу від довжини хвилі зондуючого лазерного випромінювання та складає 150 нм, при довжині хвилі 532 нм.

Для розрахунку максимальних похибок вимірювання параметрів Стокса прийняті максимальні відхилення при завданні азимуту орієнтації оптичної індикатриси фотопружного модулятора, фазового зсуву та інтенсивності джерела випромінювання відповідно:  $\Delta\alpha=0,1^\circ$ ,  $\Delta\delta=0,5^\circ$ , та  $\Delta I/I=0,001$ . Оскільки похибки не корельовані між собою, результуюча похибка визначення параметрів Стокса  $\Delta S_{\max}=1,5\%$ . При відомих значеннях абсолютних похибок вимірювання параметрів Стоксу, похибки визначення елементів матриці Мюллера складають  $\Delta m_j \leq 2\%$ .

В табл. 2. представлені параметри чутливості для чотирьох діапазонів вимірювання фотопружного мікроскопу, які вибираються перемикачем в залежності від необхідної чутливості вимірювання. При цьому на виході помножувача при максимальному входньому сигналі формується потенціал до  $\pm 3$  В, який на мінімальній чутливості відповідає величині двоприменезаломлення  $\delta = \vartheta = \pi / 3$  рад. При перемиканні фотопружного мікроскопу в більш чутливий режим, діапазон вимірювання двоприменезаломлення зменшується на коефіцієнт пропорційності 100.

Проведений розрахунок відносної методичної похибки  $\Delta_{\text{MET}}$  при перетворенні величини двоприменезаломлення в середнє значення напруги в діапазоні  $0^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$ . Встановлено, що максимальна методична похибка не перевищує 36% при проведенні вимірювань в межах  $\vartheta = 0 \dots 60^\circ$ , та сягає свого максимального значення  $\Delta_{\text{MET}}^{\max} = 36\%$  при  $\vartheta = 90^\circ$ .

На основі статистичного аналізу похибок вимірювання встановлена максимальна основна похибка фотопружного мікроскопу, при якій він придатний для вимірювань.

Таблиця 2. Чутливість вимірювання величини двопронезаломлення в межах  $0^\circ \leq \vartheta \leq 60^\circ$ , з методичною похибкою не більше 18%.

Діапазон	Величина дво.- ломлення, $\vartheta$ [градусів]	Чутливість, $S_\vartheta$ [ B / 1° ]	С/Ш на вході, [дБ]	С/Ш на виході, [дБ]
1	$0^\circ \leq \vartheta \leq 60^\circ$	0,05	$50,5 \div 65$	$65 \div 85$
2	$0^\circ \leq \vartheta \leq 0,6^\circ$	5	$10,5 \div 50,5$	$65 \div 85$
3	$0^\circ \leq \vartheta \leq 0,006^\circ$	500	$-29,5 \div 10,5$	$65 \div 85$
4	$0^\circ \leq \vartheta \leq 0,00006^\circ$	50000	$-69,5 \div -29,5$	$60 \div 70$

Границя припустимої основної похибки встановлена згідно ГОСТ 8.401-80 «Класи точності засобів вимірювань. Загальні вимоги». Межа допустимої відносної основної інструментальної похибки для діапазону  $0^\circ \leq \vartheta \leq 60^\circ$  описується виразом:

$$\delta = \pm \left[ 10 + 0.01 \left( \frac{x_k}{x} - 1 \right) \right] \% \quad (16)$$

де  $x_k$  — кінцеве значення шкали,  $x$  — виміряна величина. Слід зазначити, що крок вимірювання (абсолютна похибка) складає 1/100 від кінцевого значення шкали, яка при всіх режимах вимірювання складає 3,46 В (відповідає величині двопронезаломлення  $\vartheta = 90^\circ$ ).

На основі теоретичних та експериментальних результатів спектральних, просторово-частотних характеристик фотопружного мікроскопу, а також спектрів його шумів встановлена система параметрів фотопружного мікроскопу.

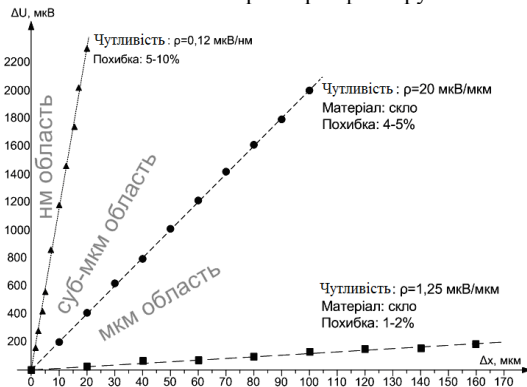


Рис. 4. Графік залежності зміни сигналу фотоприймача від зміщення у випадку різних фазових об'єктів.

Модуляція стану поляризації лазерного випромінювання та використання оптимального кореляційного фільтру дозволило реєструвати сигнал на резонансній частоті 60 кГц на рівні 10 нВ. Така висока чутливість дозволяє при квазілінійному розподілі величини двопронезаломлення реалізувати шкалу вздовж якої можна реєструвати механічні переміщення.

На рис. 4. представлені отримані результати вимірювань надмалих переміщень трьох різних фазових об'єктів, які представляють собою бруски, всередині яких присутні штучно створені або власні механічні напруження. Також

запропоновано умовний розподіл діапазонів вимірювання надмалих зміщень в залежності від роздільної здатності та чутливості, яка задається оптичними та геометричними властивостями



фазових об'єктів.

Представлені результати демонструють лінійну залежність у різних діапазонах вимірювання, яка зберігається при малих величинах двопронезаломлення (до  $30^\circ$ ), при великих кутах зсуву починають проявлятися нелінійні ефекти.

Дана методика є перспективною для вимірювання температурного коефіцієнту лінійного розширення матеріалів та їх структур в інтегральних мікросхемах та оптичних кристалах. Аналіз параметрів Стокса лазерного випромінювання, з допомогою фотопружного мікроскопу з підвищеною чутливістю, дає інформацію про механічні та теплові напруження між оптичними та функціональними шарами структур «напівпровідник-метал» та «метал-метал».

Результати вимірювань нестационарних механічних напружень з допомогою фотопружного мікроскопу створюють передумови розробки нових мікроелектронних сенсорів тиску, температури, концентрації розчинів, тощо.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розроблена методика та техніка підвищення в межах двох порядків чутливості синхронно-фазового методу вимірювання величини двопронезаломлення, що дозволяє реєструвати за рахунок модуляції стану поляризації нестационарні зміни величини двопронезаломлення в матеріалах електроніки, які містять інформацію про градієнт температури, механічні напруження та деформації. Максимальна чутливість вимірювання фазового зсуву між ортогональними компонентами лазерного випромінювання складає  $2\pi \cdot 10^{-8}$  радіан. На основі фізико-топологічної моделі реалізований один із можливих приладів з підвищеною чутливістю для реєстрації кінетики зміни коефіцієнтів двопронезаломлення в малорозмірних оптичних матеріалах. Для прецизійного фокусування та позиціонування застосовані сучасні методи, які на основі визначених властивостей нестационарного фотопружного ефекту дозволили створити мікроскоп, що забезпечує одночасну поляриметрію та мікроскопію матеріалів в діапазонах малих значень величини двопронезаломлення (на товщині зразка 1 см: від  $10^{-8}$  до 0,1). В таких зазначених діапазонах інші методи не дають чітких результатів або похибка вимірювання сягає понад 100%.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. На основі проведеного теоретичного аналізу методів модуляційної поляриметрії запропоновано оптимальну методику модуляції стану поляризації лазерного випромінювання шляхом використання фотопружного модулятора з наступними параметрами: спектральний діапазон модульованого випромінювання 0,2-2 мкм; частота модуляції 60 кГц та 120 кГц; глибина модуляції 99% (при  $\lambda/4$ ); напруга живлення кварцового резонатора 40-50 В; розміри резонатора: 10х15х45 мм; розміри активної чвертьхвильової фазової пластинки: 10х15х50 мм. Ця методика, на відміну від існуючих методів, дозволяє використовувати низькі напруги живлення резонатора та реєструвати величину двопронезаломлення, викликану нестационарними механічними напруженнями в діапазоні  $\Delta n = 10^{-8}$  з експериментально підтвердженням відношення сигнал/шум=65 дБ.

2. Відповідно до одержаних результатів моделювання на основі матричного методу Максвелла-Джонса отримані спектральні характеристики інтенсивності випромінювання, що реєструється фотоприймачем. Реалізована методика модуляційної поляриметрії з використанням фотопружного модулятора, яка на відміну від існуючих, забезпечує, необхідний коефіцієнт модуляції ортогональних компонент лазерного випромінювання. Це

досягається за рахунок того, що разом з амплітудою, фазою та частотою додатково аналізується орієнтація вектора напруженості електричного поля та еліптичність випромінювання.

3. Відповідно до проведеного аналізу акустичних та механічних вібрацій (структурного шуму), фото- та електричних шумів запропоновано та реалізовано схему оптимального кореляційного фільтру для їх усунення. Для боротьби зі структурним шумом здійснено перетворення просторового відхилення лазерного променя в змiну розподілу його інтенсивності по площі поперечного перерізу. Наукова новизна вказаних методів, що дали змогу зменшити шумові фото-акустичні фактори на 40-85 дБ, підтверджена патентом.

4. Вперше на основі розв'язків рівняння теплопровідності з використанням гіперболічних функцій знайдено коефіцієнт передачі фотопружного ефекту, теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено механізм еволюції механічних напружень (деформацій) в процесі їх релаксації в умовах навколишнього середовища, що на відміну від існуючих рівнянь дає змогу описати механізм нестационарного термофотопружного ефекту. Спроековано джерело нестационарних теплових процесів у вигляді плівкового терморезистора, який генерує теплові імпульси гаусівської форми з енергією 1Дж та тривалістю 10мс, що дозволило підтвердити ергодичність нестационарної фотопружності на проміжку часу кореляції.

5. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблена та описана фізико-математична модель нестационарної фотопружності в твердому тілі. Це дає змогу описувати твердотільні матеріали електроніки шляхом розрахунку коефіцієнтів передачі фотопружного ефекту для різних початкових та граничних умов, спростити розрахунки шляхом переходу від тензорних величин до відповідних коефіцієнтів без втрати достовірності результатів у порівнянні з класичними громіздкими методами теорії термодинаміки з великою кількістю змінних параметрів. Адекватність математичних моделей оцінювалась за критеріями Кохрена для рівня значущості 5%, та коефіцієнтом кореляції, який складає понад 90%.

6. На підставі отриманих теоретичних та експериментальних даних встановлено, що метод модуляції стану поляризації чутливий не тільки до низькочастотних шумів, а й до відхилення ряду електрооптичних параметрів системи. Таким чином встановлена система параметрів при здійсненні поляризаційних вимірювань, яка дозволила сформувати достатню теоретичну основу для створення фотопружного мікроскопу, новизна котрого підтверджена патентом.

7. Вперше запропоновано модель та реалізовано сенсор субмікронних переміщень на основі застосування «замороженої» фотопружності з використанням рішень попередніх задач, встановлені вимоги до його параметрів та конструкції. Це дало змогу вимірювати зміщення в діапазонах: 150 нм з похибкою 10%, 1 мкм з похибкою 5%, 10 мкм з похибкою 2% лише за рахунок зміни чутливості вимірювання та без зміни еталону. Новизна спроектованого сенсора надмалих зміщень підтверджена патентом.

8. Вперше проведено розрахунок похибок нового фотопружного мікроскопу, викликаних похибкою вимірювання параметрів Стокса та елементів матриці Мюллера, та на цій основі встановлено, що їх похибка складає не більше 0,2%. Проведений аналіз шумів та похибок позиціонування зразка у фотопружному мікроскопі показав, що похибка при граничній чутливості 10 нВ (відповідає  $10^{-8}$  рад) та на межі роздільної здатності 150 нм не перевищує 20%.

9. На основі фізико-топологічної моделі фотопружного мікроскопу, встановлених властивостей нестационарних механічних напружень та їх впливу на параметри стану

поляризації практично реалізована одна із модифікацій фотопружного мікроскопу з підвищеною чутливістю, що обумовлює практичну цінність роботи. На основі матричного аналізу функціональних блоків знайдені просторово-частотні характеристики фотопружного мікроскопу, енергетичні спектри його шумів та корисного сигналу фотоприймача, встановлена система основних параметрів фотопружного мікроскопу з підвищеною чутливістю:

- Чутливість до зміни величини фази, рад:	$\Delta\varphi = 2\pi \cdot 10^{-8}$ ;
- Максимальна градаційна позиційна чутливість, мкм:	10/1/0,5/0,1
- Мінімальний розмір скануючої лазерної плями, мкм:	1,5-10
(в залежності від довжини хвилі)	
- Максимальна роздільна здатність, (залежить від довжини хвилі) мкм:	0,15-2,5
- Чутливість до відносної зміни показника заломлення $\Delta n/n$ ( $d=1\text{ см}$ ):	$10^{-12}$
- Гранична чутливість в залежності від діапазонів вимірювання:	
- Діапазон 1 (грубий), мВ:	10
- Діапазон 2 (чутливий), мкВ:	100
- Діапазон 3 (чутливий), мкВ:	1
- Діапазон 4 (надчутливий), нВ:	10
- Відношення сигнал/шум (на граничній чутливості 10нВ), дБ:	65
- Номінальне відношення сигнал/шум (Діапазони 1-3), дБ:	85
- Максимальна відносна похибка, %:	20
- Постійна часу, с:	$10^{-3-30}$

Таким чином, теоретично обґрунтовано та підтверджено дослідженнями, що розроблений в даній дисертаційній роботі фотопружний мікроскоп з підвищеною чутливістю забезпечує реєстрацію нестационарних механічних напружень та деформацій в матеріалах електроніки. Практично досліджені: скло, оптично прозорі композити з нульовим ТКР, кварц, полікарбонат, Si-Al структури, ніобат літію. На відміну від існуючих аналогічних приладів диференціальної поляриметрії, новий фотопружний мікроскоп має підвищену чутливість та швидкодію за рахунок застосування оптимальної фільтрації сигналу, що в свою чергу забезпечує високі метрологічні параметри, та в практичному застосуванні дозволяє вимірювати надмалі механічні переміщення еталонних зразків з градаційною роздільною здатністю до 150 нм.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Matyash I. E. Detection of stresses induced by heat flux in a solid by using a photoelastic microscope/ I. E. Matyash, I. A. Minaylova, O. N. Mischuk, O. O. Oliinyk. // Electronics and communications. – 2014. – №2 (79). – С. 9-22.

2. Жовнір М. Ф. Розробка пристроїв на ПАХ для вимірювання лінійних та кутових переміщень. Частина 1 / М. Ф. Жовнір, О. О. Олійник // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип.: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 52 (1161). – С. 60-65.

3. Олійник О.О. Реєстрація модуляційно-поляризаційним методом механічних напружень в поверхневих плівках на твердотільній підкладці / О.О. Олійник, Б. А. Циганок. // Електроніка та зв'язок. – №4(87). – 2016. – С. 9-14.

4. Олійник О. О. Модуляційно-поляризаційний метод вимірювання внутрішніх механічних напружень в мікроелектронних структурах Si-Al / О. О. Олійник // Вісник Нац.

техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип.: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2016. – № 17 (1189). – С. 3-7.

5. Олійник О. О. Розрахунок механічних напружень на основі вимірювань двоповерхового заломлення у звукопроводах ПАХ-пристроїв / О. О. Олійник, М. Ф. Жовнір, Б. А. Циганок // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 7 (1179). – С. 66-71.

6. Zhovnir M. F. Mathematical Models of Pressure and Microdisplacement Sensors Based on Electric Field Perturbation of the Surface Acoustic Waves / M. F. Zhovnir, O. O. Oliinyk, L. D. Pysarenko // Journal of Nano- and Electronic Physics. – №8(1). – 2016. – 10241-10245.

7. Патент №65666 Україна, МПК G01Q 60/00. Пристрій для фемтосекундної спектроскопії з мінімізацією власних шумів / Б. А. Циганок, О. О. Олійник (Укр.); заявник і власник патенту НТУУ «КПІ». – U201106661; заявл. 27.05.2011; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.

8. Пат. 78510 UA, МПК G01N 21/41 (2006.01) Пристрій для фотопружної мікроскопії твердих тіл та їх структур / О. О. Олійник, Б. А. Циганок, Б.К. Сердега; заявник і правовласник НТУУ «КПІ». – №. U201209377; заявл. 31.07.2012 ; опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.

9. Пат. 74814 UA, МПК G01N 21/41 (2006.01) Спосіб градаційного вимірювання надмалих зміщень твердотільних структур поляризаційно-модуляційним методом / О. О. Олійник, Б. А. Циганок, Б. К. Сердега; заявник і правовласник НТУУ «КПІ». – №. U201205269; заявл. 27.04.2012 ; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.

10. Oliinyk O. Investigation of nonstationary thermo-photo-elastic effect using the polarization modulation of radiation / Oliinyk O., Tsyganok B., Serdega B., Matiash I. // Electronics Technology (ISSE). – 2011. – №34. – P. 294-298.

11. Application of photoelastic microscopy for researches in MEMS technology and photonics / O. Oliinyk, B. Tsyganok, B. Serdega, B. Matiash. // Electronics Technology (ISSE). – 2012. – №35. – P. 224-229.

12. Chernenko D. Wireless passive sensor using frequency coded SAW structures / D. Chernenko, M. Zhovnir, O. Oliinyk, B. Tsyganok. // The 35th Int. Spring Seminar on Electronics of IEEE. – 2012. – Pp. 424 – 428.

13. Олійник О. О. Фотопружна мікроскопія нестационарних процесів в оптично прозорих матеріалах, фотонних кристалах та біологічних об'єктах // Електроніка-2012: зб. мат. V міжнар. наук.-тех. конф. мол. вч., Київ. / М-во освіти та науки України, НТУУ «КПІ». – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – С. 243-246.

14. Олійник О. О. Фотопружна мікроскопія оптичної анізотропії твердотільних прозорих кристалів кварцу, скла та фотонних кристалів / О. О. Олійник, Б. А. Циганок. // Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. VI наук.-практ. конф. Київ. / М-во освіти та науки України, НТУУ «КПІ». – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – С. 11-14.

15. Мішукова В. О. Модуляційно-поляризаційний метод вимірювання надмалих зміщень в електро-механічних системах / В. О. Мішукова, О. О. Олійник. // Електроніка-2012: зб. мат. V міжнар. наук.-тех. конф. мол. вч., Київ. / М-во освіти та науки України, НТУУ «КПІ». – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – С. 191-194.

16. Цуркан І. Ф. Мемристор на основі неоднорідностей в кристалах / І. Ф. Цуркан, О. О. Олійник, Б. А. Циганок. // Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. VIII наук.-практ. конф. Київ. / М-во освіти та науки України, НТУУ «КПІ». – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 137-140.

17. Олійник О. О. Перспективи розвитку модуляційно-поляризаційних приладів для досліджень анізотропії матеріалів електроніки. / О. О. Олійник, Б. А. Циганок. // Перспективні напрямки сучасної електроніки: зб. мат. VIII наук.-практ. конф. Київ. / М-во освіти та науки України, НТУУ «КПІ». – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 8-11.

#### Анотація

**Олійник О. О. Підвищення чутливості вимірювання мікроскопу нестационарної фотопружності для дослідження матеріалів електроніки. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

Дисертація присвячена вдосконаленню модуляційно-поляризаційного методу реєстрації механічних напружень шляхом підвищення чутливості вимірювання наведеного нестационарними процесами двопронезаломлення в матеріалах електроніки. Проведено моделювання та технічну реалізацію фотопружного мікроскопу з підвищеною чутливістю на основі досліджень нестационарної фотопружності в матеріалах електроніки для вимірювання в них величини двопронезаломлення. Описана методика розрахунку приповерхневих та внутрішніх механічних напружень. Продемонстроване практичне застосування фотопружного мікроскопу для вимірювання механічних переміщень фотопружних еталонів з градаційними змінами показників заломлення.

На основі розрахунків спектрів шумів модулятора, теплового, структурного, та інших шумів показано, що серед шумових факторів в процесі вимірювання домінуючими є тепловий шум, шум підсилювача та низькочастотні вібрації.

Для модуляції лінійної та циркулярної компоненти лазерного випромінювання використаний фотопружний модулятор. Для підвищення чутливості реєстрації корисного сигналу запропонована синтезований оптимальний кореляційний фільтр, який додатково реалізує функцію синхронно-фазового детектування корисного та опорного сигналів на фоні шумів. Отримані вирази, які описують відношення С/Ш на виході фотопружного мікроскопу та його методичну та інструментальну похибки.

Проведений порівняльний аналіз модуляційно-поляризаційних приладів з розробленим фотопружним мікроскопом для вимірювання механічних напружень, пошуку оптичних неоднорідностей в матеріалах.

**Ключові слова:** підвищення чутливості, величина двопронезаломлення, вимірювання фази, модуляційна поляриметрія, фотопружний мікроскоп, сенсор переміщення.

#### Анотация

**Олейник О. О. Повышение чувствительности измерения микроскопа нестационарной фотопружности для исследования материалов электроники. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника. – Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев, 2017.

Диссертация посвящена совершенствованию модуляционно-поляризационного метода регистрации механических напряжений путем повышения чувствительности измерения двулучепреломления, вызванного нестационарными процессами в материалах электроники. Проведено моделирование и практическая реализация фотопружного микроскопа с повышенной чувствительностью на основе исследований нестационарной фотопружности в материалах электроники для измерения в них величины двулучепреломления. Описанные

методика расчета приповерхностных и внутренних механических напряжений. Продemonстрировано практическое применение фотоупругого микроскопа для измерения механических перемещений фотоупругих эталонов с градиционными изменениями показателей преломления.

На основе расчетов спектров шумов модулятора, теплового, структурного и других шумов показано, что среди шумовых факторов в процессе измерения доминирующими являются тепловой шум, шум усилителя и низкочастотные вибрации.

Для модуляции линейной и циркулярной компоненты лазерного излучения использован фотоупругий модулятор. Для повышения чувствительности регистрации полезного сигнала синтезирован оптимальный корреляционный фильтр, который дополнительно реализует функцию синхронно-фазового детектирования полезного и опорного сигналов на фоне шумов. Получены выражения, описывающие отношения С/Ш на выходе фотоупругого микроскопа и его методическую и инструментальную погрешности.

Проведен сравнительный анализ модуляционно-поляризационных приборов с разработанным фотоупругим микроскопом для измерения механических напряжений, поиска оптических неоднородностей в материалах.

**Ключевые слова:** повышение чувствительности, величина двулучепреломления, измерения фазы, модуляционная поляриметрия, фотоупругий микроскоп, сенсор перемещения.

### Summary

**Oliynyk O. O. Microscope measurement sensitivity increase for nonstationary photoelasticity research in electronic materials. – Manuscript.**

The PhD thesis, specialty 05.27.01 – solid-state electronics. – National Technical University of Ukraine "KPI", Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to improving of modulation-polarization method for mechanical stress registration by increasing the measurement sensitivity of birefringence created by non-stationary processes in electronic materials. The modeling and technical implementation of photoelastic microscope is made on the base of nonstationary photoelasticity research in electronic materials to measure the birefringence values in them. The calculation method of the surface and internal mechanical stresses is described. Practical application of photoelastic microscope is demonstrated as mechanical displacement measurement of photoelastic bar with internal changes in refractive index.

On the base of the modulator noise spectrum, thermal, structural, and other noises calculations it is shown that thermal noise, amplifier noise and low frequency vibration are the dominant.

For linear and circular modulation of laser radiation components photoelastic modulator is used. To increase the sensitivity of the signal registration an optimal correlation filter is synthesized, which simultaneously perform lock-in detection of reference and useful signals under background noise. Equations that describe the S/N ratio in the output of photoelastic microscope are obtained as well as methodological and instrumental error.

For mechanical stresses measurements and search of irregularities in optical materials it is made the comparative analysis of modulation polarization devices and designed photoelastic microscope.

**Keywords:** sensitivity increase, the value of the birefringence, the phase measurement, modulation polarimetry, photoelastic microscope, displacement sensor.