

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ”

Чичура Ігор Іванович



УДК 53.096, 535.337,
535.343.2, 535-15

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-
ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ ТЕМПЕРАТУРИ**

спеціальність 01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Ужгород – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладобудування інженерно-технічного факультету Ужгородського національного університету.

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук,
Туряниця Іван Іванович,
доцент, декан Інженерно-технічного факультету
Ужгородського національного університету.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор,
Прокопенко Ігор Васильович,
керівник центру колективного користування приладами.
«Діагностика напівпровідникових матеріалів, структур та
приладних систем» Інституту фізики напівпровідників
НАН України, (м. Київ);

доктор фізико-математичних наук, професор,
Рубіш Василь Михайлович,
завідувач Ужгородської лабораторії матеріалів
оптоелектроніки та фотоніки. Інституту проблем реєстрації
інформації. НАН України, (м. Ужгород).

Захист відбудеться “28” квітня 2021 р. об год. хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 61.051.01 у ДВНЗ “Ужгородський національний університет” Міністерства освіти і науки України за адресою: 88000, м. Ужгород, вул. Волошина, 54, ауд. 181.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ДВНЗ “Ужгородський національний університет” (м. Ужгород, вул. Університетська, 14).

Автореферат розісланий “27” березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 61.051.01
доктор фіз.-мат. наук, професор



Грабар О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. На ринку вимірювальних систем і датчиків домінує положення й надалі займають електронні вимірювальні технології, які передбачають перетворення вимірювального параметра в електричний сигнал та наступну його обробку. Альтернативою такому підходу є використання волоконно-оптичних систем вимірювання, де вимірюваний параметр перетворюється в оптичний сигнал, що передається по оптичному волокну. Незважаючи на постійне зростання ринку волоконно-оптичних датчиків, відносна доля таких приладів в загальному ринку вимірювальних систем залишається невеликою. По суті, волоконно-оптичні датчики займають тільки нішові позиції там, де традиційні вимірювальні засоби не можуть бути використані або їх використання є дуже затратним.

Проте варто відзначити дві тенденції, що спостерігаються на сьогодні. По-перше, бурхливий розвиток суміжних технологій на основі волоконно-оптичної передачі інформації, прийому і обробки зображень за допомогою цифрової фото- та відеоапаратури, мікропроцесорної техніки сприяє розвитку оптоволоконної вимірювальної техніки і здешевленню їх виготовлення. По-друге, промисловість та регулюючі органи висувають все більш жорсткі вимоги до умов експлуатації різних пристроїв, зокрема заводо захищеності, безпеки вимірювань, точності та ін. По-третє, очевидними є переваги оптоволоконних систем над електронними технологіями: вибухобезпечність, відсутність чутливості до інтенсивних електромагнітних перешкод, висока роздільна здатність, заводостійкість оптичних каналів, передачі інформації на кілометрових відстанях тощо. Всі ці критерії здатні задовольнити сучасні оптоволоконні датчики. Відповідно, вказані три тенденції свідчать про конкурентоспроможність оптоволоконних вимірювальних систем по відношенню до традиційних електронних як за робочими характеристиками, так і за економічними показниками. Дослідженню напівпровідникових матеріалів та термочутливих елементів (ТЧЕ) на їх основі для важливого типу сучасних оптоволоконних систем - волоконно-оптичних датчиків температури (ВОДТ) і присвячена дана робота, що й визначає її актуальність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в науково-дослідній лабораторії «Волоконно-оптичних приладів та систем» кафедри приладобудування Державного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет». Тематика роботи відповідає науковим програмам Міністерства освіти та науки України з фундаментальних досліджень. Основні результати роботи увійшли у звіти по НДР:

1. тема № 0116U003323 «Прилади і системи екологічного моніторингу до-вкілля» (роки виконання: 2016-2018 р.р.);
2. тема № 0119U101432 «Автоматизація та моделювання комплексних авто-номних електроенергетичних систем» (роки виконання: з 2019 р. по тепері-шній час).

Мета і завдання дослідження. Вирішення наукової задачі моделювання та оптимізації оптичних параметрів легованих кристалів GaAs та стекол систе-ми As-Se й термочутливих елементів на їх основі для розробки дистанційних волоконно-оптичних датчиків температури з екстремальними умовами роботи (інтенсивні електромагнітні поля, високі радіаційні потоки, вибухонебезпечні середовища).

Для досягнення поставленої мети у процесі виконання роботи необхідно було вирішити такі *наукові та науково-методичні завдання*:

1. аналіз сучасного стану розробок волоконно-оптичних термометрів (ВОТ);
2. оптимізація технології виготовлення оптичних ТЧЕ із напівпровіднико-вих кристалів та стекол;
3. експериментальні й теоретичні дослідження в широкому температурному діапазоні змін спектрів краю оптичного поглинання легованих кристалів GaAs та стекол системи As-Se і ТЧЕ на їх основі;
4. моделювання й теоретичні дослідження оптичних параметрів та характе-ристик оптичних ТЧЕ із легованих кристалів GaAs та стекол системи As-Se;
5. розробка, оптимізація параметрів та виготовлення експериментального стенду для досліджень експлуатаційних параметрів ТЧЕ;
6. експериментальні дослідження оптичних ТЧЕ та порівняльний аналіз їх результатів із теоретичними та модельними даними.

Об'єктами досліджень є оптичні процеси на краю поглинання напівпрові-дникових кристалів і стекол та у ВОДТ на їх основі в умовах зміни температури навколишнього середовища.

Предметом дослідження є леговані кристали GaP, GaAs і халькогенідні стекла системи As-Se та ТЧЕ і ВОДТ на їх основі.

Методи досліджень, які використані для досягнення поставленої мети ди-сертації:

1. аналіз фізичних основ функціонування та принципів побудови ВОДТ на основі напівпровідникових матеріалів;
2. технологічні методи формування ТЧЕ із стекол системи As-Se;
3. спектральні методи визначення параметрів краю поглинання напівпрові-дників та його зсуву при варіюванні температури в широкому діапазоні;

4. методи оптимізації конструкції та фізичних параметрів ВОДТ на основі напівпровідникових кристалів та стекол;
5. моделювання поведінки краю поглинання ТЧЕ при зміні їх температури;
6. фотоелектричні методи реєстрації інформаційних сигналів від ВОДТ;
7. методи оптимізації електроніки блоку обробки сигналів від ВОДТ.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. У широкому діапазоні температур від 240 К до 450 К експериментально та теоретично досліджено спектри пропускання в області оптичного краю поглинання легованих кристалів GaP і GaAs, стекол системи As-Se та термочутливих елементів на їх основі для волоконно-оптичних датчиків температури.

2. Вперше на основі результатів експериментальних досліджень для області краю поглинання визначено числові параметри функції коефіцієнта оптичного поглинання кристалів GaP, GaAs та стекол $As_{45}Se_{55}$, залежної від двох змінних: енергії фотонів випромінювання та температури. На базі отриманої функції розроблено фізичні основи створення ТЧЕ із вказаних напівпровідникових матеріалів з чутливістю у межах від 0,002 в.о./К до 0,003 в.о./К.

3. Вперше методами оптимізації та теоретичного моделювання показано, що оптимальним поєднанням фізичних параметрів й характеристик для створення чутливих елементів волоконно-оптичних термометрів для екстремальних умов використання володіють халькогенідні стекла $As_{45}Se_{55}$.

4. Вперше проведено моделювання фізичного процесу проходження оптичного випромінювання через оптичний тракт двохканального ВОДТ з напівпровідниковими ТЧЕ з врахуванням параметрів всіх його елементів від джерела випромінювання до фотоприймача. У результаті встановлено оптимальну величину (близько 0,8) коефіцієнта поділу Y-розгалужувача оптичного тракту та діапазон змін потужності випромінювання на виході оптичного тракту (від 1 мВт до 5 мВт). Показано, що такі величини потужності випромінювання достатні для створення нових напівпровідникових сенсорів температури.

5. На основі моделей джерела випромінювання та оптичного тракту ВОДТ отримано математичне співвідношення температурної чутливості стекол $As_{45}Se_{55}$. Аналізом температурної чутливості визначено діапазон вимірюваних температур ЧЕ на основі скла $As_{45}Se_{55}$, від 270 К до 430 К, що підтверджено експериментальними дослідженнями.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Розроблено нову технологію виготовлення ЧЕ високої оптичної якості для ВОДТ із халькогенідних стекол методом розчавлювання при близьких до склування умовах.

2. Розроблений теоретичний підхід та виведені математичні співвідношення суттєво спрощують практичну розробку та оптимізацію експлуатаційних

параметрів термочутливих елементів із напівпровідникових матеріалів для використання у різних температурних діапазонах.

3. Створено діючий макет ВОТ для експериментальних досліджень параметрів і характеристик ВОДТ. На макеті показано, що для оптимізованої конструкції ВОДТ на основі скла $As_{45}Se_{55}$ відносна похибка вимірювання температури у діапазоні від 250 К до 400 К не перевищує 0,3 %.

Отримані результати можуть бути використані для конструювання нових та покращення параметрів вже існуючих ВОТ, призначених для роботи в різних несприятливих зовнішніх умовах та при надійній передачі даних на кілометрові відстані. Результати роботи вже використовуються для проведення лабораторних робіт студентами за напрямком підготовки "Автоматизація та приладобудування".

Особистий внесок здобувача полягає у наступному: пошук та аналіз літературних джерел, які стосуються теми роботи; розробка й реалізація експериментальної установки оптичних досліджень матеріалів та волоконно-оптичних систем; запропонування та апробація методик проведення моделювання оптичних процесів й оптимізації параметрів волоконно-оптичних датчиків температури із різними чутливими елементами; проведення численного моделювання поведінки краю поглинання напівпровідникових матеріалів зі зміною температури; оптимізація конструкції та параметрів волоконно-оптичних датчиків; експериментальні дослідження експлуатаційних характеристик датчиків температури. Формулювання мети та задачі досліджень, вибір теоретичних та експериментальних методів, обговорення отриманих результатів проводилося разом з науковим керівником к.ф.-м.н. доцентом Туряницею І.І.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження оприлюднені у вигляді усних та стендових доповідей на:

- II Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених та студентів. «Фізика і хімія твердого тіла. Стан досягнення і перспективи» (м. Луцьк, 2012 р.);
- 3-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції. «Інформаційно-вимірювальні технології, технічне регулювання та менеджмент якості». ОДАТРЯ (м. Одеса, 2013 р.);
- XII Міжнародній науково-технічній конференції. «Приладобудування: стан і розвиток, перспективи» КПІ. (м. Київ, 2013 р.);
- 6-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених і студентів «Сучасний стан та перспективи розвитку системи технічного регулювання, метрології та якості» ОДАТРЯ. (м. Одеса, 2015 р.);
- 7-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів. «Тенденції розвитку технічного регулювання та метрології в

умовах трансформації законодавства в Україні». ОДАТРЯ. (м. Одеса, 2016р.);

- 8-й Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Технічне регулювання, метрологія та якість виклики сучасності». ОДАТРЯ (м. Одеса, 2017 р.);
- 73-й Науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів. (м. Одеса, 2018 р.);
- International Meeting «Clusters and nanostructured materials» (CNM-5) (м. Ужгород, 2018 р.);
- 10-й Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Технічне регулювання, метрологія, якість, інформаційні та транспортні технології». ОДАТРЯ (м. Одеса, 2019 р.);
- International Meeting «Clusters and nanostructured materials» (CNM-6) (м. Ужгород, 2020 р.).

Публікації. Автором самостійно написана наукова робота [13]; йому належить основний внесок у написання статей [5 та 15]; внесок у написання інших статей спільно з І.І. Туряницею, О.В. Козусенком є рівнозначним.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 165 сторінок з яких 125 становлять основний текст дисертації. Робота містить 75 рисунків, а також 11 таблиць та список використаних джерел із 84 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та коротко викладено завдання для її досягнення, зроблено короткий огляд стану ринку волоконно-оптичних технологій та відзначено наукову новизну і наукову та практичну цінність одержаних результатів. Також представлено структуру і обсяг дисертації, подано інформацію щодо апробації результатів досліджень з теми дисертації та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** представлено короткий опис фізичних та експлуатаційних властивостей оптичних волокон, що є основою ВОДТ. Проаналізовано та представлено класифікацію ВОДТ і ВОТ та наведено їх основні експлуатаційні характеристики, переваги та недоліки. Досліджено конструктивні особливості основних типів сучасних ВОДТ та ВОТ. Виконано критичний аналіз їх позитивних та негативних рис, а також експлуатаційних параметрів. Даний аналіз показує, що для широкого використання найбільш підходящими є волоконно-

оптичні датчики ампліудного типу з ТЧЕ на основі напівпровідникових матеріалів. Також встановлено, що для практичного застосування таких ВОДТ необхідним є суттєво покращити їх технічні та метрологічні характеристики. Дана задача може бути розв'язана шляхом всесторонньої оптимізації параметрів як вихідних термочутливих матеріалів, так і конструкції й основних характеристик всіх елементів ВОТ.

У **другому розділі** розглянуто технології виготовлення ТЧЕ на основі кристалічних та склоподібних напівпровідників. Технологічні дослідження, проведені у даному розділі, демонструють, що ЧЕ високої якості можна одержати з напівпровідникових кристалів GaP та GaAs методом шліфування, полірування та електрополірування. Продемонстровано вплив якості поверхні таких ЧЕ на залежність їх оптичного пропускання на різних довжинах хвилі.

Дослідження способів виготовлення ЧЕ з халькогенідних стекол системи As-Se показали, що методика шліфування та полірування не дозволяє одержати якісні ЧЕ необхідної товщини. Дана проблема спонукала до пошуку іншого способу виготовлення таких елементів на основі халькогенідних стекол. У роботі запропонована нова методика виготовлення таких ЧЕ, заснована на явищі різкого зменшення в'язкості, яке спостерігається у халькогенідних стекол при досягненні ними температури близької до температури розм'якшення. Це дозволяє виготовляти ЧЕ необхідної товщини методом розчавлення у спеціально сконструйованій термічній камері.

Розроблена камера складається з пресу для формування ТЧЕ з крупинок скла. Даний прес має дві робочі деталі: нижню та верхню. Між ними поміщалися вихідні крупинки скла відповідного хімічного складу. Для нагріву крупинок прес поміщався в термокамеру з нагрівником, між двох термоізоляційних керамічних дисків та зовнішнього термоізоляційного кожуха на поверхню масивної основи для збільшення теплової інерційності системи. Тягарем, необхідної маси, створювалося механічне навантаження на крупинку. Система контролю температури термокамери була побудована на базі приладу РИФ-101. Вона складається з силового та програмного блоків, термопари і термостату. Момент досягнення в термокамері температури розм'якшення скла та початку деформації крупинки фіксувався за початком змін показів висотоміру.

У таблиці 1 наведено величини температур розм'якшення стекол As-Se різних хімічних складів, при яких процес формування взірців ЧЕ проходить в оптимальних технологічних умовах, де T_r – робоча температура, при якій витримувалися зразки у процесі формування ЧЕ, а t_0 – час, за який відбувалося охолодження взірця від температури формування пластинки до кімнатної температури.

Також даний розділ присвячено опису експериментальних стендів, за допомогою яких проводилися оптичні дослідження в широкому температурному діапазоні.

Для проведення спектральних досліджень було створено оптичний лабораторний стенд на основі спектрофотометра СФ-46. При температурних дослідженнях взірці поміщалися у спеціальний термобокс. Оптичне випромінювання від спектрометра направлялось на взірець у термобоксі за допомогою оптичних волокон

(ОВ). Отриманий від взірця сигнал направлявся для аналізу на реєструючу систему спектрофотометра за допомогою такого ж ОВ.

При температурних дослідженнях здійснювався лінійний нагрів взірця та стабілізація його температури за допомогою терморегулятора РИФ-101. Для вимірювання температури взірців у середині термоблоку використовувалися термостат та (хромель-алюмелева) термопара. У процесі експериментальних досліджень система стабілізації температури працювала з використанням пропорційного, інтегрального та диференціального законів обробки сигналу термопари. Це забезпечувало зменшення похибок регулювання швидкості нагрівання та підвищувало точність стабілізації температури в термобоксі. Абсолютна похибка стабілізації температури не перевищувала $\pm 0,5$ К. Автоматизація роботи здійснювалася за допомогою USB - модуля для ПК National instruments USB-6210. Даний стенд дозволяє проводити дослідження спектрів термочутливих елементів у широкому діапазоні температур від 240 К до 450 К.

Для дослідження експлуатаційних характеристики ВОДТ та ВОТ було також розроблено спеціалізований лабораторний стенд. Його конструкція дозволяє швидко змінювати різні ВОДТ або встановлювати в нього цілий ВОТ. Даний стенд побудовано на основі спеціалізованого оптоелектронного регістратора основою якого став блок аналогової обробки інформаційних оптичних сигналів з їх амплітудною модуляцією. Умовно він може бути поділений на дві частини: вузол випромінювача, який забезпечує модульований стабілізований потік світла, та вузол фотоприймача із підсилювача та демодулятора. У розрив цих двох частин вводиться ВОДТ.

Розроблена установка складається з: оптоелектронного регістратора; джерела випромінювання; приймача випромінювання; оптичних волокон; термобоксу; терморегулятора РИФ-101; USB-модуля для ПК. Його конструкція дозволя-

Таблиця 1

Робочі температури на яких відбувався процес формування ЧЕ та тривалість процесу

Склад стекол As-Se	T_r , К	t_o , год
As ₃₀ Se ₇₀	438	2-3
As ₃₅ Se ₆₅	441	2-3
As ₄₀ Se ₆₀	443	3-4
As ₄₅ Se ₅₅	451	3-4
As ₅₀ Se ₅₀	454	3-4
As ₅₅ Se ₄₅	460	3-4
As ₆₀ Se ₄₀	463	3-4

ла швидко змінювати різні ВОДТ або встановлювати в нього цілий ВОТ. Фізичною основою роботи стану є реєстрація інтенсивності оптичних сигналів на фіксованій характеристичній довжині хвилі. Як виявилось у процесі експериментальних досліджень, даний метод має цілий ряд переваг: простота конструкції елементів стану, надійність реєстрації сигналу, відтворюваність результатів, хороші технічні характеристики, можливість легкої адаптації для реальних ВОТ, які працюють у небезпечних зонах (підвищеної пожежної та вибухової небезпеки, високий рівень електромагнітного та радіоактивного випромінювання тощо).

Третій розділ даної роботи присвячено дослідженню спектрів поглинання та вибору оптимальних напівпровідникових матеріалів для чутливих елементів ВОДТ, а також аналізу перспективних оптичних схем та вибору оптимальної схеми і хімічного складу ЧЕ для ВОДТ.

У роботі проводилися дослідження температурних спектрів пропускання ЧЕ виготовлених з напівпровідникових кристалів GaP та GaAs легованих Zn. Концентрація легуючої домішки для кристалів GaP складала $2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ та $6,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для кристалів GaAs. Температурна залежність коефіцієнта оптичного поглинання α ЧЕ виготовленого із кристалу GaP в області краю поглинання при різних температурах (T) представлені на рис. 1.

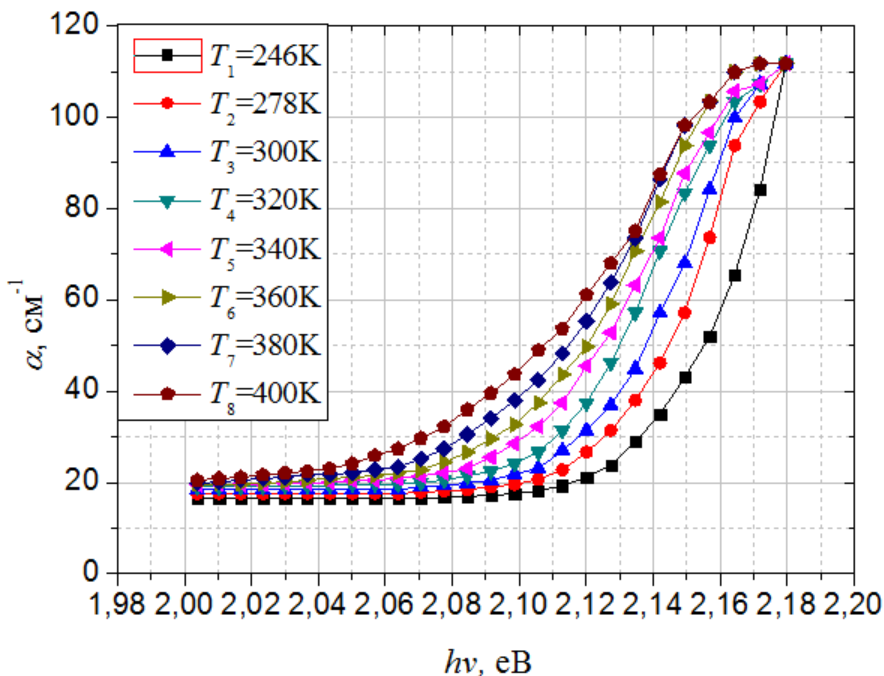


Рис. 1 Спектральна залежність коефіцієнта оптичного поглинання α ЧЕ із кристалів GaP при різних температурах

Теоретичною обробкою експериментальних результатів отримано характеристики спектрів краю поглинання даних кристалів та визначено такі параметри ЧЕ на основі легованих кристалів у вказаному діапазоні температур:

- для GaP ширина оптичної забороненої зони змінюється від 2,15 еВ до 2,04 еВ; параметр коефіцієнта поглинання α_0 змінюється від $6,88 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ до $3,01 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$; крутизна

спектру пропускання в області краю поглинання змінюється від

0,035 (в.о.)/нм до 0,009 (в.о.)/нм; температурний коефіцієнт ширини забороне-ної зони рівний $6 \cdot 10^{-4}$ еВ/К; температурний коефіцієнт зсуву краю поглинання рівний $12,5 \text{ см}^{-1}/\text{К}$; область робочих довжин хвиль λ_0 ЧЕ від 585 нм до 600 нм; температурна чутливість ЧЕ змінюється від $3,04 \cdot 10^{-3}$ (в.о.)/К для $\lambda_0 = 585$ нм до $0,89 \cdot 10^{-3}$ (в.о.)/К для $\lambda_0 = 600$ нм;

- для GaAs ширина оптичної заборонеї зони змінюється від 1,42 еВ до 2,16 еВ; крутизна спектру пропускання в області краю поглинання змінюється від 0,013 (в.о.)/нм до 0,007 (в.о.)/нм; температурний коефіцієнт ширини заборонеї зони рівний $5,1 \cdot 10^{-4}$ еВ/К; область робочих довжин хвиль λ_0 ЧЕ від 950 нм до 1060 нм; температурна чутливість ЧЕ змінюється від $2,84 \cdot 10^{-3}$ (в.о.)/К для $\lambda_0 = 990$ нм до $1,68 \cdot 10^{-3}$ (в.о.)/К для $\lambda_0 = 1020$ нм.

Дані дослідження показали такі принципові недоліки ЧЕ виготовлених із напівпровідникових кристалів: для ЧЕ на основі кристалів GaP спостерігається слабка чутливість та висока нелінійність температурної характеристики, а для ЧЕ на основі кристалів GaAs характерним є вузький діапазон вимі-

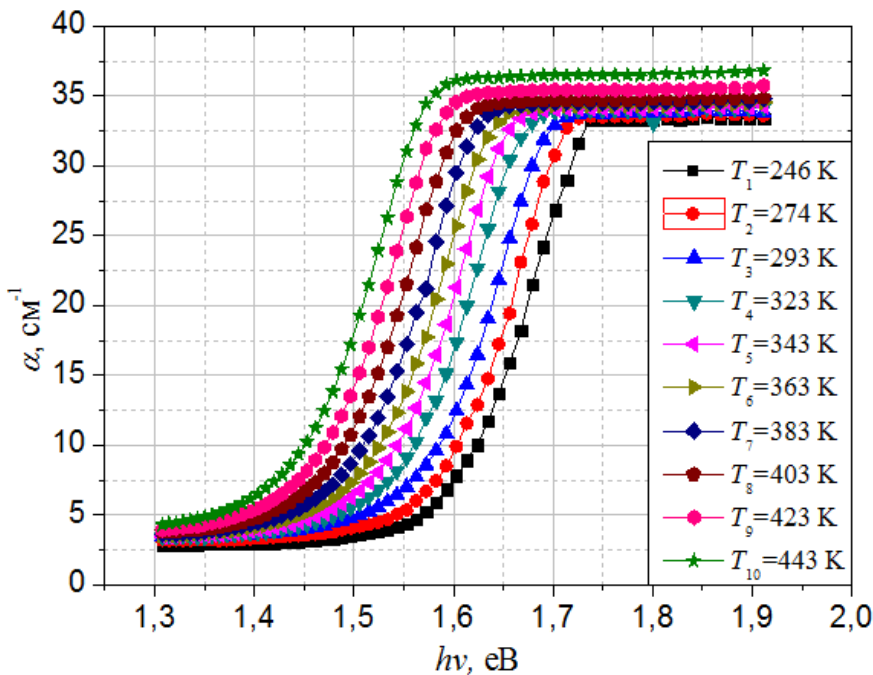


Рис. 2 Спектральні залежності коефіцієнта оптичного поглинання стекол $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$ при різних температурах (T)

рювань температури на одній робочій довжині хвилі. Також у даному розділі було проведено експериментальні дослідження спектрів пропускання стекол різних хімічних складів системи As-Se при кімнатній температурі. Визначено, що для виготовлення ЧЕ ВОДТ підходять стекла із вмістом атомів миш'яку від 25 ат.% до 60 ат.%. Показано, що змінюючи хімічний склад даних стекол у вказаному

діапазоні можна оптимізувати оптичні характеристики ЧЕ під різні робочі довжин хвиль λ_0 джерел випромінювання та фотоприймачів ВОТ. Визначено, що оптимальне поєднання всіх експлуатаційних характеристик мають ЧЕ із халькогенідних стекол $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$.

Для оптимального хімічного складу халькогенідного скла $As_{45}Se_{55}$ проведено комплекс досліджень спектрів поглинання при різних температурах (рис.2). При цьому встановлено, що: ширина оптичної забороненої зони змінюється від 1,62 еВ до 1,47 еВ, температурний коефіцієнт ширини забороненої зони рівний $5,7 \cdot 10^{-4}$ еВ/К; область робочих довжин хвиль λ_0 ЧЕ від 800 нм до 815 нм; температурна чутливість ЧЕ дуже слабо змінюється для різних робочих довжин хвиль оптичного випромінювання і лежить біля величини $1,85 \cdot 10^{-3}$ (в.о.)/К.

У третьому розділі також проведено теоретичний аналіз краю оптичного поглинання скла $As_{45}Se_{55}$. Для цього створено математичну модель краю поглинання ЧЕ, яка в подальшому використовувалася для теоретичних розрахунків передавальної характеристики ВОДТ.

Принципи побудови моделі:

- основою моделі є отримана з експериментальних даних двохвимірною областю $\alpha(h\nu, T)$ залежності коефіцієнта поглинання матеріалу ЧЕ від частоти випромінювання та температури;

- модель будувалася шляхом логарифмічного представлення області $\alpha(h\nu, T)$ за законом Урбаха:

$$\ln[\alpha(h\nu, T)] = \ln[A(T)] + \left(\frac{h\nu - E_g(T)}{E_0(T)} \right);$$

- параметри-функції моделі $A(T)$, $E_g(T)$, $E_0(T)$ визначались методами математичної обробки експериментальних даних області $\alpha(h\nu, T)$ в комп'ютерній оболонці MatLab;

- кінцева модель представлена у вигляді явної функції коефіцієнта поглинання:

$$\alpha(h\nu, T) = (0,01 \cdot T + 8,44) \exp\left(\frac{h\nu + 9,89 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 1,15 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,72}{5,05 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,065} \right).$$

У моделі енергія фотонів вимірюється в еВ, температура - у Кельвінах, коефіцієнт оптичного поглинання - у $см^{-1}$.

Побудована модель суттєво спрощувала проведення теоретичного аналізу, моделювання та оптимізації параметрів ВОДТ.

Також у даному розділі роботи здійснено вибір оптимального типу оптичної схеми ВОДТ з напівпровідниковим ЧЕ та вибір елементів оптичного тракту для оптимальної оптичної схеми. Проведені дослідження показали, що оптимальним поєднанням параметрів володіють ВОДТ на основі однопроменевої двоканальної оптичної схеми із чутливим елементом на основі скла $As_{45}Se_{55}$ та джерелом випромінювання у вигляді лазерного діода з робочою довжиною хвилі 808 нм і двома фотодіодами для реєстрації оптичного сигналу. Дана схема

складається з: джерела випромінювання, двох приймачів випромінювання, для забезпечення роботи відповідно робочого та опорного каналів, волоконно-оптичного Y-подільника, оптичних волокон та ТЧЕ.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено аналізу та розрахункам передавальної характеристики ВОДТ, а також теоретичному й експериментальному дослідженню його експлуатаційних параметрів. У даному розділі проведено розрахунки потужності випромінювання на вікнах фотодіодів. Для даного розрахунку побудована модель ВОДТ оптимальної конструкції. Дана модель враховує такі параметри:

- просторовий розподіл потоку інтенсивності джерела випромінювання;
- коефіцієнт ефективності фокона ($\sim 3,9$);
- френелівське відбивання на всіх межах розділу оптичних середовищ обох каналів;
- довжину оптичного тракту із ОВ з погонним коефіцієнтом втрат 0,5 дБ/км;
- коефіцієнт поділу Y-подільника (біля 80% робочий канал, 20% опорний);
- створену модель для ЧЕ $\alpha(h\nu, T)$ у вигляді функції коефіцієнта пропускання ЧЕ при різних температурах.

На основі побудованої моделі розраховано потужності випромінювання на фотодіодах для оптимальної конструкції ВОДТ. Встановлено, що для робочого каналу моделі вихідна потужність випромінювання змінюється від 1 мВт до 5 мВт при змінах температури від 240 К до 450 К, а для опорного каналу потужність залишається незмінною на рівні величини 4,5 мВт.

Орієнтуючись на отримані величини оптичних потоків випромінювання, визначені діапазони змін вихідного електричного сигналу фотодіодів для оптимальної оптичної схеми ВОТ. При проведенні даного розрахунку враховувались такі параметри як спектральний розподіл випромінювальної здатності джерела, температурна залежність спектру пропускання чутливого елемента та спектральний розподіл чутливості фотоприймача. Розрахунок проводився шляхом інтегрального представлення даних параметрів, а розрахунки інтегралів виконувались методом чисельного інтегрування з використанням прикладних програм пакету Mathcad. Це дозволяє оперативно одержувати вихідні значення струмів фотодіодів обох каналів при моделюванні різних варіантів оптичних схем ВОДТ та при заміні окремих елементів в них. Результати моделювання та теоретичних розрахунків лягли в основу розробки електронного блоку реального експериментального макету ВОТ на основі ЧЕ із напівпровідникових матеріалів.

Проведено також і розрахунки впливу флуктуацій густини та товщини чутливого елемента на параметри ВОТ температури. Отримані у роботі залежності показали, що із ростом температури посилюється вплив нерівномірностей тов-

щини чутливого елемента на його пропускання. Відповідно при верхній межі температурного діапазону для чутливого елемента із скла $As_{45}Se_{55}$ такі зміни досягають 1,5 % при досить великих відносних величинах $\varepsilon = 10$ %. Якщо врахувати, що величина пропускання чутливого елемента для верхньої межі вимірювальних температур рівна біля 6 %, то вплив неоднорідностей товщини на пропускання τ є великим і сильно впливає на чутливість та точність вимірювання саме високих температур ВОТ. Розрахунки показують, що при таких варіаціях товщини чутливого елемента потужність випромінювання на фотодіоді може змінюватись на 20 %. Таким чином, неоднорідність по товщині чутливого елемента за рахунок варіацій пористості матеріалу є важливим параметром, який сильно впливає на метрологічні характеристики ВОТ, особливо в області вимірювань високих температур. Це вимагає чіткого контролю технологічних умов виготовлення чутливих елементів, проведення окремої паспортизації кожного чутливого елемента, який встановлюється у ВОДТ та періодичного тестування чутливого елемента в умовах їх безпосередньої експлуатації.

У даному розділі проведено й теоретичний аналіз чутливості ВОДТ з ТЧЕ із скла $As_{45}Se_{55}$. У результаті аналізу отримано в явному вигляді функцію температурної чутливості ВОДТ:

$$\chi(h\nu, T) = \frac{d\tau(h\nu, T)}{dT} = -0,55 \cdot \exp[-\alpha(h\nu, T) \cdot d] \cdot d \cdot \alpha(h\nu, T) \cdot [Z(h\nu, T)].$$

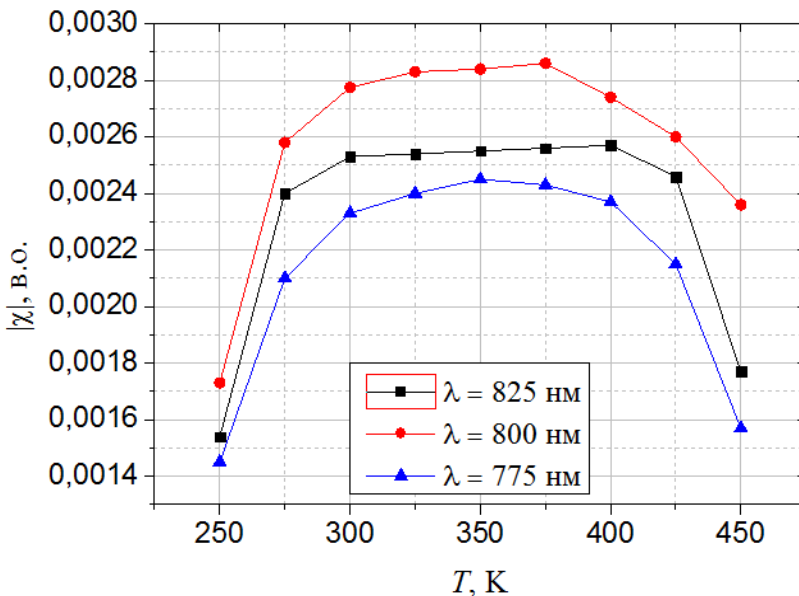


Рис.3 Чутливість ВОДТ на основі халькогенідного скла $As_{45}Se_{55}$ для різних робочих довжин хвиль (товщина чутливого елемента 0,4 мм)

Отримані результати показують, що теоретично досяжними для оптимальних ВОДТ на основі халькогенідних стекел є чутливості на рівні біля 0,28 %/К. Тобто, зміна температури ЧЕ на 1 К теоретично повинна приводити до змін його пропускання на 0,28 %. Одночасно показано, що найбільші за значенням чутливості такого ВОДТ можливо реалізувати на робочих довжинах хвиль біля 0,8 мкм (рис. 3).

Проведений аналіз показує, що діапазон вимірюваних температур ВОДТ на основі скла $As_{45}Se_{55}$ доцільно обмежити інтервалом від 270 К до 430 К. У межах даного інтервалу чутливість ВОДТ є максимальною і приблизно постійною для заданої робочої довжини хвилі (рис. 3). За межами ж вказаного інтервалу температур чутливість ВОДТ різко спадає.

Проаналізовано вплив спектральної нестабільності параметрів оптичного тракту ВОДТ на його чутливість. Визначено, що елементи оптичного тракту ВОДТ на основі напівпровідникових матеріалів мають забезпечувати стабільність робочої довжини хвилі випромінювання на рівні її варіації у межах кількох нанометрів. Проведені у даному розділі теоретичні дослідження спектральної та температурної стабільності параметрів джерела випромінювання свідчать про необхідність термостабілізації блока світлодіода із кристалів GaAs для забезпечення високої чутливості та точності вимірювань ВОТ.

У даному розділі розроблено й структурну схему експериментального макету для досліджень експлуатаційних параметрів ВОДТ. Експериментальні дослідження за допомогою створеного макету ВОТ передавальної характеристики ВОДТ на основі скла $As_{45}Se_{55}$ у вигляді залежності напруги фотоприймача від температури ЧЕ показали її поведінку, дуже близьку до лінійної (рис.4). При цьому виявлено хорошу кореляцію експериментальних параметрів макету ВОТ із результатами теоретичного моделювання ЧЕ та ВОДТ на основі скла $As_{45}Se_{55}$.

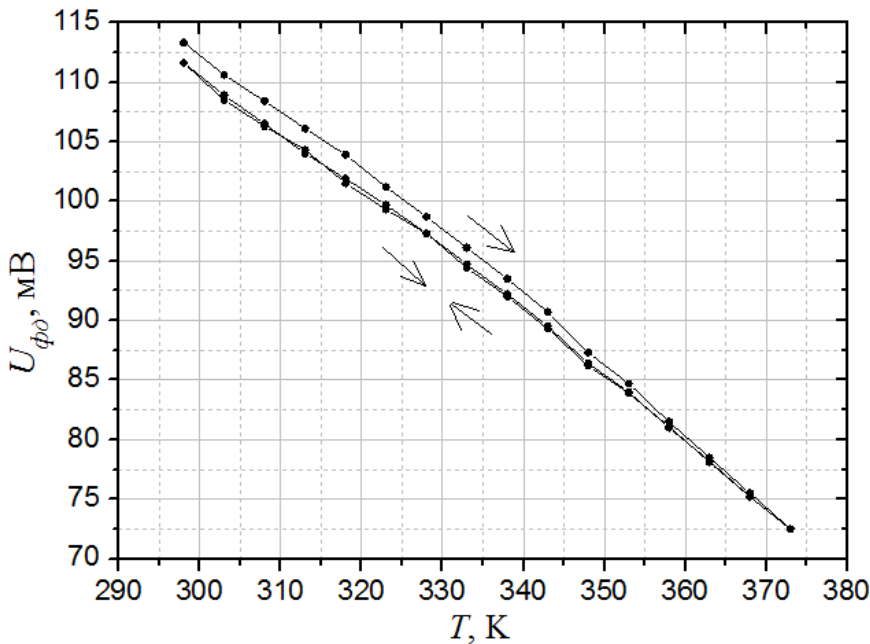


Рис. 4 Графік залежності напруги фотоприймача від температури термочутливого елемента при декількох циклах його нагрівання і охолодження

На рис. 4 наведено залежності напруги фотоприймача від зміни температури ТЧЕ на основі скла $As_{45}Se_{55}$ при декількох циклах його нагрівання та охолодження. Як видно з рис. 4, у процесі першого циклу нагрівання та охолодження спостерігається невеликий гистерезис показів. Усі подальші нагрівання та охолодження взірця (експериментально було досліджено 10

таких циклів) не демонстрували проявів гістерезису у межах похибки вимірювання, що свідчить про повторюваність показів та стабільність роботи експериментального макету та електронної схеми ВОТ. Дані результати також демонструють необхідність початкової стабілізації ЧЕ на основі скла $As_{45}Se_{55}$, шляхом його прогріву до максимальної температури та охолодження із забезпеченням оптимальної швидкості нагрівання та охолодження для забезпечення оптимальної роботи у заданому температурному діапазоні конкретного ВОДТ.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Експериментально досліджено спектри краю поглинання легованих кристалів GaP і GaAs, стекол системи As-Se та ТЧЕ на їх основі в широкому діапазоні температур від 240 К до 450 К. На основі експериментальних даних визначені параметри співвідношення Урбаха для опису коефіцієнта оптичного поглинання стекол As-Se у вигляді функції температури та енергії фотонів для області краю поглинання. Встановлено діапазон хімічних складів стекол системи As-Se із вмістом атомів миш'яку від 25 ат.% до 60 ат.%, які підходять для виготовлення ТЧЕ.

2. Досліджено технологічні особливості отримання ЧЕ високої оптичної якості для ВОДТ різними методами з: легованих Zn кристалів GaP, GaAs та стекол системи As-Se і плівок на їх основі. Показано, що найкращим поєднанням фізичних, технологічних та експлуатаційних параметрів для ТЧЕ володіють халькогенідні стекла. Для даних матеріалів розроблено нову технологію виготовлення ТЧЕ методом розчавлювання при близьких до склування умовах.

3. Показано, що вибираючи різні кристали та варіюючи хімічний склад стекол системи As-Se можна оптимізувати оптичні характеристики ТЧЕ під різні робочі довжини хвиль джерел випромінювання та під різні температурні діапазони роботи ВОТ.

4. Створено фізичну модель оптичного тракту ВОДТ для оптимізації їх конструкції. Теоретично досліджено фізичні процеси проходження оптичного випромінювання через робочий та опорний канали створеної моделі. Теоретично розраховані потужності випромінювання на виході каналів моделі оптичного тракту ВОДТ, які змінюються в діапазоні від 1 мВт до 5 мВт. Експериментально показано, що такі потужності можуть бути надійно виміряні сучасними фотодіодами з незначною похибкою.

5. Для створеної моделі теоретично досліджено вплив температурних змін, спектральної та термічної нестабільності параметрів джерела випромінювання та оптичного тракту, а також флуктуацій густини та товщини ЧЕ на точ-

ність вимірювань температури ВОТ. Встановлено оптимальні параметри та умови використання ЧЕ із напівпровідникових матеріалів у складі ВОДТ.

6. Вперше отримано математичне співвідношення для температурної чутливості ВОДТ на основі напівпровідникових матеріалів. Встановлено, що цей параметр визначається переважно оптичним поглинанням матеріалу ЧЕ та його товщиною. Показано, що діапазон вимірюваних температур ВОДТ на основі скла $As_{45}Se_{55}$ доцільно обмежити інтервалом від 270 К до 430 К, у межах якого чутливість ВОДТ є максимальною.

7. Створено макет ВОТ, на якому експериментально досліджено передавальні характеристики ВОДТ із ЧЕ на основі скла $As_{45}Se_{55}$. Виявлено хорошу кореляцію експериментальних параметрів макету ВОТ із результатами теоретичних розрахунків параметрів моделі ВОДТ. Встановлено, що передавальні характеристики ВОДТ близькі до лінійних, а абсолютна похибка вимірювання температури не перевищує 1,5 К.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Туряниця І.І., Чичура І.І. Волоконно-оптичний датчик з чутливим елементом з халькогенідного скла. Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції Молодих вчених та студентів. Луцьк. СС. 294-296. 19-20 жовтня 2012 р.
2. Туряниця І.І., Чичура І.І., Деяк Т.В. Порогові параметри чутливого елемента волоконно-оптичного датчика температури (ВОДТ). Зб. Тез доповідей XII Міжн. Наук.-техн. Конф. «Приладобудування: стан і розвиток, перспективи». - Україна, Київ, НТУУ «КПІ», СС. 169. 23-24 квітня 2013 р.
3. Туряниця І.І., Чичура І.І., Бутурлакін О.П. Блок реєстрації волоконно-оптичного давача температури. Зб. Тез доповідей XII Міжн. Наук.-техн. Конф. «Приладобудування: стан і розвиток, перспективи». Україна, Київ, НТУУ «КПІ», СС. 170-171. 23-24 квітня 2013 р.
4. Бутурлакін О.П., Чичура І.І., Туряниця І.І. Блок реєстрації волоконно-оптичного давача температури. Збірник наукових праць 3-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції. Одеська державна академія технічного регулювання та якості. Одеса, СС.44-46. 30-31 травня 2013 р.
5. Туряниця І.І., Козусенок О.В., Чичура І.І. Чутливий елемент волоконно-оптичного датчика температури, його виготовлення і оптимізація характеристик. Науковий вісник УжНУ, серія Фізика. Вип. 33. СС. 175-180. 2013 р.
6. Бутурлакін О.П., Чичура І.І., Туряниця І.І. Прецизійний модулятор оптичного сигналу волоконно-оптичного вимірювача температури. Четверта

всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів. «Проблеми технічного регулювання та якості», Одеса, СС.60-61. 09-10 жовтня 2014 р.

7. Чичура І.І., Козусенок О.В. Вплив нестабільності температури джерела випромінювання на точність вимірювання ВОДТ. Матеріали Наукові праці шостої Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених і студентів «Сучасний стан та перспективи розвитку системи технічного регулювання, метрології та якості», Одеса, СС.117-119. 21-22 травня 2015 р.
8. Чичура І.І., Бутурлакін О.П., Кучінко О.М. Волоконно-оптична вимірювальна система для температурного контролю високовольтного електричного обладнання. Збірник наукових праць 7-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. ОДАТРЯ.- Одеса, СС.188-189. 19-20 травня 2016 р.
9. Туряниця І.І., Чичура І.І., Козусенок О.П., Вакула А.А. Аналіз термостабільності джерела випромінювання волоконно-оптичного перетворювача. Збірник наукових праць 7-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. ОДАТРЯ. Одеса, СС. 180-187. 19-20 травня 2016. р.
10. Чичура І.І., Степа М.М., Бутурлакін О.П. Волоконно-оптичний датчик температури. Збірник наукових праць 8-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Технічне регулювання, метрологія та якість виклики сучасності». ОДАТРЯ.- Одеса, СС. 113–116. 18-19 травня 2017.
11. Chychura I.I., Turianytsia I.I., Kozusenok O.V. Temperature sensors based on the thin films of As-Se system. 73-я науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів. Частина II. Одеса, С. 8. 12-14 грудня 2018.
12. Chychura I.I., Turianytsia I.I., Kozusenok O.V. Transmission characteristic of fiber optic temperature sensor with chalcogenide glass sensing element. Journal of optoelectronics and advanced materials. Vol.21, No.1-2, PP. 48-53. January – February 2019.
13. Igor Chychura. Fiber-optic temperature sensors with chalcogenide glass and crystalline sensing elements. Part of the book: Optical Fiber Applications. Сер. 7. (Open Access Books) 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89207>.
14. Чичура І.І., Козусенок О.В., Туряниця І.І. Вибір оптимальної товщини чутливого елемента волоконно-оптичного датчика температури та його робочі довжини хвилі. Десята всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів. «Технічне регулювання , метрологія, якість, інформаційні та транспортні технології». ОДАТРЯ.- Одеса, СС. 89–90.

16-17 травня 2019.

15. Chychura, Ig.I., Turianytsia, I.I., & Chychura, Iv.I., (2020). Temperature dependence of the optical absorption edge of doped gallium arsenide. *Physics and Chemistry of Solid State*. V.21, No.2 pp.288-293. 2020.
16. Turianytsia I.I., Chychura I.I., Kutchak S.V. Automation of fiber optic thermometers with GaAs nanopowders as temperature sensitive elements condensation. *Materials of the international Meeting “Clusters and nanostructured materials (CNM-6)” Uzhgorod, Ukraine*, P.317. 2020.

АНОТАЦІЯ

Чичура І.І. Моделювання та оптимізація характеристик волоконно-оптичних датчиків температури. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – фізика напівпровідників та діелектриків. – ДВНЗ “Ужгородський національний університет” Міністерства освіти і науки України, Ужгород, 2021.

Робота присвячена дослідженню амплітудних волоконно-оптичних датчиків температури з чутливими елементами на основі кристалічних напівпровідників, халькогенідних стекел та плівок на їх основі.

Вивчено технологічні особливості отримання чутливих елементів високої оптичної якості для волоконно-оптичних датчиків температури різними методами з різних напівпровідникових матеріалів: легованих Zn кристалів GaP, GaAs та стекел системи As-Se і плівок на їх основі.

Експериментально досліджено в області краю поглинання спектри пропускання легованих кристалів GaP і GaAs, стекел системи As-Se та чутливих елементів на їх основі в широкому температурному діапазоні від 240 К до 450 К. Визначена робоча область спектру для чутливих елементів волоконно-оптичних термометрів, температурна чутливість чутливого елемента для різних робочих довжин хвиль.

Встановлено діапазон хімічних складів стекел системи As-Se із вмістом атомів миш'яку від 25 ат.% до 60 ат.%, які підходять для виготовлення чутливих елементів волоконно-оптичних датчиків температури. Продемонстровано, що вибираючи різні кристали та варіюючи хімічний склад стекел системи As-Se у вказаному діапазоні можна оптимізувати оптичні характеристики чутливих елементів під різні робочі довжини хвиль джерел випромінювання та під різні температурні діапазони роботи волоконно-оптичних термометрів.

Теоретично отримано в явному вигляді математичне співвідношення для опису коефіцієнта оптичного поглинання стекел $As_{45}Se_{55}$ як функцію температури

та енергії фотонів для області краю поглинання. Дане співвідношення суттєво спрощує проведення теоретичного аналізу, розрахунку та оптимізації експлуатаційних параметрів волоконно-оптичних датчиків температури.

Оптимізовано конструкцію оптичного тракту волоконно-оптичного датчика температури і проведено відповідні розрахунки для моделювання процесу проходження оптичного випромінювання через його робочий та опорний канали.

Методами моделювання та теоретичними розрахунками оцінено вплив температурних змін, спектральної та термічної нестабільності параметрів джерела випромінювання та оптичного тракту, флуктуацій густини та товщини чутливого елемента на точність вимірювань температури.

Проведено експериментальні дослідження передавальної характеристики за допомогою створеного макету волоконно-оптичного термометра та чутливого елемента зі скла $As_{45}Se_{55}$.

Ключові слова: кристалічний напівпровідник, халькогенідний склоподібний напівпровідник, термочутливий елемент вимірювання температури, волоконно-оптичний термометр.

АННОТАЦІЯ

Чичура И.И. Моделирование и оптимизация характеристик волоконно-оптических датчиков температуры. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков. - ДВУЗ "Ужгородский национальный университет" Министерства образования и науки Украины, Ужгород, 2021.

Работа посвящена исследованию амплитудных волоконно-оптических датчиков температуры с чувствительными элементами на основе кристаллических полупроводников, халькогенидных стекол и пленок на их основе. Изучены технологические особенности получения чувствительных элементов высокого оптического качества для волоконно-оптических датчиков температуры различными методами из разных полупроводниковых материалов: легированных Zn кристаллов GaP, GaAs и стекол системы As-Se и пленок на их основе. Экспериментально исследованы в области края поглощения спектры пропускания легированных кристаллов GaP и GaAs, стекол системы As-Se и чувствительных элементов на их основе в широком температурном диапазоне от 240 К до 450 К. Определена рабочая область спектра для чувствительных элементов волоконно-оптических термометров, температурная чувствительность чувствительных элементов для различных рабочих длин волн. Установлено диапазон химических составов стекол системы As-Se с содержанием атомов мышьяка от 25 ат.%

до 60 ат.%, которые подходят для изготовления чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков температуры. Продемонстрировано, что выбирая различные кристаллы и варьируя химический состав стекол системы As-Se в указанном диапазоне можно оптимизировать оптические характеристики чувствительных элементов под различные рабочие длины волн источников излучения и под разные температурные диапазоны работы волоконно-оптических термометров. Теоретически получено в явном виде математическое соотношение для описания коэффициента оптического поглощения стекол $As_{45}Se_{55}$ как функцию температуры и энергии фотонов для области края поглощения. Данное соотношение существенно упрощает проведение теоретического анализа, расчета и оптимизации эксплуатационных параметров волоконно-оптических датчиков температуры. Оптимизировано конструкцию оптического тракта волоконно-оптического датчика температуры и проведены соответствующие расчеты для моделирования процесса прохождения оптического излучения сквозь его рабочий и опорный каналы. Методами моделирования и теоретическими расчетами оценено влияние температурных изменений, спектральной и термической нестабильности параметров источника излучения и оптического тракта, флуктуаций плотности и толщины чувствительного элемента на точность измерений температуры. Проведены экспериментальные исследования передаточной характеристики с помощью созданного макета волоконно-оптического термометра и чувствительного элемента из стекла $As_{45}Se_{55}$.

Ключевые слова: кристаллический полупроводник, халькогенидный стеклообразный полупроводник, термочувствительный элемент измерения температуры, волоконно-оптический термометр.

ABSTRACT

Chychura I.I. Mass-spectrometry of ionization and dissociative ionization processes of the amino acid molecules by electron impact. – *Qualification scientific work. Manuscript.*

Thesis is submitted to acquire the scientific degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences, specialty 01.04.10 – physics of semiconductors and dielectrics. – State Higher Educational Establishment “Uzhhorod National University”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Uzhhorod, 2021.

Present thesis is devoted to the study of amplitude fiber-optic temperature sensors with sensitive elements based on crystalline semiconductors, chalcogenide glasses and films based on them. The technological features of obtaining high optical quality sensitive elements for fiber-optic temperature sensors by different methods from different semiconductor materials: doped Zn crystals of GaP, GaAs and glasses of the

As-Se system and films based on them have been studied. The transmission spectra of doped GaP and GaAs crystals, glasses of the As-Se and sensitive elements based on them in the wide temperature range from 240 K to 450 K were experimentally investigated in the region of the absorption edge; temperature sensitivity of the sensitive elements for different operating wavelengths. The range of chemical compositions of glasses of the As-Se system with the content of arsenic atoms from 25 at.% to 60 at.% Which are suitable for manufacturing of sensitive elements for fiber-optic temperature sensors is established. It is shown that by choosing different crystals and varying the chemical composition of As-Se system glasses in the specified range, it is possible to optimize the optical characteristics of the sensitive elements for different operating wavelengths of radiation sources and for different temperature ranges of fiber-optic thermometer. Theoretically, the mathematical relation for describing the optical absorption coefficient of $As_{45}Se_{55}$ glasses as a function of the temperature and energy of photons for the region of the absorption edge is explicitly obtained. This ratio significantly simplifies the theoretical analysis, calculation and optimization of operational parameters of fiber-optic temperature sensors. The design of the optical path of fiber-optic temperature sensor is optimized and the corresponding calculations for modeling of the process of passing of optical radiation through its working and reference channels are carried out. The influence of temperature changes, spectral and thermal instability of the parameters of the radiation source and optical path, fluctuations in the density and thickness of the SE on the accuracy of temperature measurements is estimated by modeling methods and theoretical calculations. Experimental studies of the transmission characteristic were performed with the help of the created model of fiber-optic thermometer and sensitive element made of $As_{45}Se_{55}$ glass.

Key words: crystalline semiconductor, chalcogenide vitreous semiconductor, thermosensitive temperature measuring element, fiber optic thermometer.

Підписано до друку 25.03.2021 р. Формат 60x90/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 0,9.
Наклад 100. Зам. 0855.

Видано та віддруковано в ТОВ “Поліграфцентр “Ліра”:
88000, м. Ужгород, вул. Митрака, 25

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
Серія ЗТ №24 від 7 листопада 2005 року.

