

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Чичура Ігор Іванович

**УДК: 53.096, 535.337, 535.343.2,
535-15**

ДИСЕРТАЦІЯ

**Моделювання та оптимізація характеристик волоконно-оптичних
датчиків температури**

01.04.10 – фізика напівпровідників і діелектриків

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І.І. Чичура

Науковий керівник: Туряниця Іван Іванович, кандидат фізико-математичних
наук, доцент, декан Інженерно-технічного факультету ДВНЗ «УжНУ»

Ужгород – 2021

АНОТАЦІЯ

Чичура І.І. Моделювання та оптимізація характеристик волоконно-оптичних датчиків температури. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.10 – «Фізика напівпровідників і діелектриків». – Ужгородський національний університет, Ужгород, 2021.

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

У роботі здійснено дослідження конструктивних особливостей основних типів сучасних волоконно-оптичних датчиків температури (ВОДТ) і волоконно-оптичних термометрів (ВОТ), критичний аналіз їхніх позитивних й негативних рис та експлуатаційних параметрів. Даний аналіз показав, що для широкого використання найбільш підходять волоконно-оптичні прилади амплітудного типу з чутливими елементами (ЧЕ) на основі напівпровідникових матеріалів. Для практичного застосування ВОТ такого типу необхідно суттєво покращити їхні технічні та метрологічні характеристики.

Технологічні дослідження, що проведені у даній роботі показують, що ЧЕ високої оптичної якості з легованих Zn кристалів GaP та GaAs з оптимальним поєднанням експлуатаційних параметрів, можна отримати шляхом виконання цілого ряду операцій: механічна обробка для надання необхідної геометричної форми; кілька етапів механічного полірування та електрополірування.

Також у ході технологічних досліджень було встановлено, що технологія шліфування та полірування не придатна для виготовлення ЧЕ високої оптичної якості з халькогенідних стекел системи As-Se. Це обумовлено рядом причин: висока крихкість та м'якість цих матеріалів, які часто зумовлюють появу сколів, тріщинок та подряпин на поверхні ЧЕ; неможливість досягнення

оптимальної товщини ЧЕ, меншої 1 мм, оскільки тривале хімічне або електрополірування приводять до неконтрольованого розм'якшення матеріалу.

Практичні дослідження показали, що ЧЕ необхідної якості із вакуумно напиливаних плівок системи As-Se можна отримати з товщинами до 3 мкм. Оптичні дослідження показали, що діапазон змін оптичного сигналу таких ЧЕ є досить малим. Це обумовлено: недостатньою товщиною чутливої плівки; впливом на проходження оптичного випромінювання всієї системи плівка-підкладка (відбивання на кількох межах розділу, вплив інтерференційних ефектів на плівці, збільшення розсіювання тощо); неконтрольовані зміни величини поглинання плівок, які стимулювалися дією оптичного випромінювання; складність нанесення на поверхню таких плівкових ЧЕ відбиваючих дзеркальних покриттів із-за стимульованої дифузії металів у ЧЕ.

У роботі розроблено технологію виготовлення ЧЕ з халькогенідних стекол системи As-Se методом роздавлення при температурах, близьких до температур склування, який виявився оптимальним для отримання ЧЕ ВОДТ амплітудного типу. Розроблено та виготовлено напівавтоматизований технологічний стенд для контрольованого виготовлення ЧЕ з халькогенідних стекол системи As-Se методом роздавлення.

Для проведених у роботі експериментальних досліджень сконструйовано дві установки, що призначені для дослідження оптичних параметрів ЧЕ та характеристик ВОДТ та ВОТ. Установка для спектральних досліджень ЧЕ зібрана на основі спектрофотометра; введено конструктиви для виведення та введення оптичних променів за допомогою оптичних волокон ; використано термобокс для досліджень матеріалів та ЧЕ при температурах від 240 К до 450 К; введено конструктиви для підключення до спектрофотометра реальної конструкції ВОДТ. Друга установка, що використовувалася для експлуатаційних досліджень оптичних схем ВОДТ зібрана на основі оптоволоконного реєстратора розробленого та виготовленого на кафедрі приладобудування Ужгородського національного університету.

У роботі експериментально досліджено спектри пропускання легованих кристалів GaP і GaAs та ЧЕ на їх основі в температурному діапазоні від 240 К до 450 К. Теоретичною обробкою експериментальних результатів отримано характеристики спектрів краю поглинання даних кристалів та визначено необхідні параметри ЧЕ на основі легованих кристалів у вказаному діапазоні температур.

Експериментально досліджено спектри пропускання стекол системи As-Se при кімнатній температурі. Показано, що змінюючи хімічний склад даних стекол у вказаному діапазоні можна оптимізувати оптичні характеристики ЧЕ під різні робочі довжини хвиль λ_0 джерел випромінювання та фотоприймачів для ВОТ.

Визначено робочі температурні характеристики ЧЕ, які для різних матеріалів мають такі особливості: для чутливих елементів із кристалів GaP ці характеристики суттєво нелінійні для всіх можливих робочих довжин хвиль ВОДТ, робота ЧЕ із напівпровідникових кристалів GaAs у широкому діапазоні температур можлива тільки з використанням кількох робочих довжин хвилі, а для стекол оптимального складу температурні характеристики лінійні для всіх робочих хвиль ВОДТ в області температур від 320 К до 450 К і спостерігається незначне відхилення їх від лінійності в області температур, менших 320 К.

Вперше теоретично отримано математичне співвідношення для коефіцієнта оптичного поглинання стекол $As_{45}Se_{55}$ в такому вигляді як функцію температури та енергії фотонів для області робочих діапазонів змін цих параметрів. Дане співвідношення суттєво спрощує проведення теоретичного аналізу, моделювання та оптимізації експлуатаційних параметрів ВОДТ. Застосовуючи розроблений підхід, аналогічне співвідношення можна отримати й для інших напівпровідникових як кристалічних, так і склоподібних матеріалів, придатних до використання у якості ЧЕ ВОДТ.

У роботі встановлено, що для амплітудних ЧЕ оптимальне поєднання технічних, функціональних, конструкційних та економічних параметрів забезпечують ВОТ на основі однопроменевої двоканальної оптичної схеми

прохідного типу з розміщенням ЧЕ в одному робочому каналі. Для такої схеми у роботі було здійснено підбір всіх компонентів оптичного тракту ВОДТ із робочою довжиною хвилі $\lambda_0 = 808$ нм.

Також у роботі проведено розрахунок проходження оптичного випромінювання через робочий та опорний канали оптимізованого оптичного тракту ВОТ із ЧЕ на основі скла $As_{45}Se_{55}$.

Результати моделювання показали, що при коефіцієнті поділу випромінювання в Y - подільнику $y = 0,5$ в.о. на робочій довжині хвилі 0,808 мкм коефіцієнти пропускання робочого та опорного каналів відповідно рівні 0,098 в.о. та 0,34 в.о. при температурі біля 300 К і 0,002 в.о. та 0,33 в.о. при температурі біля 450 К.

Теоретично розраховані потужності випромінювання на виході обох каналів оптичного тракту показують, що для оптимальної конструкції оптичного тракту потужності випромінювання на його виході наближаються до 4,4 мВт для опорного каналу та змінюються в межах від 1 мВт до 5 мВт для робочого каналу. Дані величини потужності випромінювання можуть бути досить надійно виміряні сучасними фотодіодами з незначною похибкою.

У роботі теоретично розраховані спектральні розподіли потужності випромінювання джерела випромінювання та чутливості фотоприймача в абсолютних одиницях. На основі таких розподілів та отриманого раніше явного вигляду функції $\alpha(h\nu, T)$ матеріалів ЧЕ створено модель розрахунків струмів фотодіодів робочого і опорного каналів ВОТ. Створена модель дозволяє швидко проводити моделювання та оптимізацію експлуатаційних характеристик ВОДТ із різних напівпровідникових матеріалів.

Також було проведено теоретичний аналіз впливу флуктуацій густини та товщини ЧЕ на точність вимірювань температури ВОТ. Показано, що даний вплив є суттєвий і вимагає чіткого контролю технологічних умов виготовлення ЧЕ з проведенням індивідуальної паспортизації кожного ЧЕ, який встановлюється у ВОДТ. Отримано у явному вигляді функцію температурної чутливості ВОДТ на основі напівпровідникових халькогенідних стекел.

Показано, що цей параметр визначається лише функцією оптичного поглинання матеріалу ЧЕ $\alpha(h\nu, T)$ та товщиною самого ЧЕ. Аналіз температурної поведінки чутливості свідчить про те, 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. За межами ж вказаного інтервалу чутливість різко спадає.

Здійснено аналіз впливу спектральної нестабільності параметрів оптичного тракту ВОДТ на його чутливість. Виявлено, що для оптимальної роботи елементи оптичного тракту ВОДТ на основі напівпровідникових матеріалів мають забезпечувати стабільність робочої довжини хвилі випромінювання на рівні її варіації у межах кількох нанометрів. Проведені теоретичні дослідження спектральної та температурної стабільності параметрів джерела випромінювання свідчать про необхідність термостабілізації блока світлодіода для забезпечення високої чутливості та точності вимірювань ВОТ.

У роботі розроблено структурну схему експериментального стенду 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. При цьому виявлено хорошу кореляцію експериментальних параметрів макету ВОТ із результатами теоретичного моделювання ЧЕ та ВОДТ на основі скла $As_{45}Se_{55}$.

Здійснені у даній роботі експериментальні дослідження ЧЕ виготовлених з халькогенідного скла $As_{45}Se_{55}$ показали повторюваність, у межах допустимої похибки, передавальної характеристики при циклічному нагріванні та охолодженні ЧЕ.

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

SUMMARY

Chychura I.I. Modeling and optimization of characteristics of fiber-optic temperature sensors. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of physics and mathematics science degree in speciality 01.04.10 «Physics of semiconductors and dielectrics». – National University of Pharmacy, Uzhhorod National University, 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 study of the design features of the main types of modern fiber-optic temperature sensors (FOTS) and fiber-optic thermometers (FOT), a critical analysis of their positive and negative features and operating parameters. This analysis showed that amplitude-type fiber-optic devices with sensitive elements (SE) based on semiconductor materials are the most suitable for wide use. For the practical application of IOPs of this type it is necessary to significantly improve their technical and metrological characteristics.

Technological research conducted in this paper show that the CHE high optical quality Zn doped crystal of GaP and GaAs with an optimal combination of operating parameters , can be obtained by performing a number of operations, machining to provide the necessary geometry; several stages of mechanical polishing and electropolishing .

Also in the course of technological research it was found that the technology of grinding and polishing is not suitable for the manufacture of high quality optical SE from chalcogenide glasses of the As-Se system. This is due to a number of reasons: high fragility and softness of these materials, which often cause chips, cracks and scratches on the surface of the SE; the impossibility of achieving the optimal thickness of the SE, less than 1 mm, as prolonged chemical or electropolishing lead to uncontrolled softening of the material.

Practical studies have shown that the SE of the required quality from vacuum-sprayed films of the As-Se system can be obtained with thicknesses up to 3 μm .

Optical study shows that the range of change of the optical signal in SE is quite small. This is due to: insufficient thickness of the sensitive film; influence on the transmission of optical radiation of the entire film-substrate system (reflection at several interface boundaries, the influence of interference effects on the film, increased scattering, etc.); uncontrolled changes in the amount of film absorption, which were stimulated by the action of optical radiation; the difficulty of applying to the surface of such film SE reflective mirror coatings due to the stimulated diffusion of metals in the SE.

In this paper the technology of manufacturing of SE from chalcogenide glasses As-Se system by squeezing method at temperatures close to the glass transition temperature is developed, which was optimal for SE of FOTS amplitude type. A semi-automated technological stand for controlled production of Euros from chalcogenide glasses of the As-Se system by crushing method was developed and manufactured.

For the experimental researches carried out in the work, two installations were constructed, which are intended for research of optical parameters of SE and characteristics of FOTS and FOT. The installation for spectral studies of the European Championship is based on a spectrophotometer; introduced constructs for output and input of optical rays with the help of optical fiber; thermoboxing was used for research of materials and SE at temperatures from 240 K to 450 K; introduced constructs for connection to the spectrophotometer of the real design of FOTS. The second installation, which was used for operational research of optical circuits of FOTS, was built on the basis of a fiber-optic recorder developed and manufactured at the Department of Instrument-Making of Uzhhorod National University.

The paper experimentally investigated the transmission spectra of crystals doped GaP, and GaAs and SE on this basis in the temperature range from 240 K to 450 K. theoretical analysis of experimental results obtained spectra characteristic absorption edge of these crystals, and defines the necessary parameters for SE based on alloy crystals in this temperature range.

The transmission spectra of the glasses of the As-Se system at room temperature were experimentally investigated. It is shown that by changing the chemical composition of these glasses in the specified range, it is possible to optimize the optical characteristics of the SE for different operating wavelengths λ_0 of radiation sources and photodetectors for FOTS.

Determined working temperature characteristics SE that different materials have the following features: for sensitive elements of the crystal GaP these characteristics are substantially linear for all possible operating wavelengths of FOTS, work SE of semiconductor crystals of GaAs in a wide temperature range is possible only with the use of several operating wavelength and for glasses optimal composition of linear temperature characteristics for all working waves of FOTS in the temperature range from 320 K to 450 K, there is a slight deviation from linearity in the temperature of less than 320 K .

For the first time, a mathematical relation was theoretically obtained for the optical absorption coefficient of $As_{45}Se_{55}$ glasses in such a form as a function of the temperature and energy of photons for the region of operating ranges of changes in these parameters. This ratio significantly simplifies the theoretical analysis, modeling and optimization of operational parameters of FOTS. Applying the developed approach, a similar ratio can be obtained for other semiconductor both crystalline and vitreous materials suitable for use as SE of FOTS.

The paper found that the amplitude SE optimum is a combination of technical, functional, structural and economic parameters provide for FOT based on single-beam dual-channel optical circuits passing type with SE placement in working channel. For such a scheme, all components of the optical path of FOTS with an operating wavelength $\lambda_0 = 808$ nm were selected in the work.

Also in the work the calculation of the passage of optical radiation through the working and reference channels of the optimized optical path of FOS with SE on the basis of glass $As_{45}Se_{55}$ is carried out.

The simulation results showed that at the radiation separation coefficient in the Y - divider $y = 0.5$ a.u. at a working wavelength of $0.808 \mu\text{m}$, the transmission

coefficients of the working and reference channels, respectively, are equal to 0.098 a.u. and 0.34 a.u. at a temperature of about 300 K and 0.002 a.u. and 0.33 a.u. at about 450 K.

The theoretically calculated radiation powers at the output of both channels of the optical path show that for the optimal design of the optical path the radiation powers at its output approach 4.4 mW for the reference channel and vary from 1 mW to 5 mW for the working channel. These values of radiation power can be quite reliably measured by modern photodiodes with a small error.

The spectral distributions of the radiation power of the radiation source and the sensitivity of the photodetector in absolute units are theoretically calculated. Based on such distributions and the previously obtained explicit form of the function $\alpha(h\nu, T)$ of the materials of the SE, a model of calculations of currents of photodiodes of the working and reference channels of the FOT is created. The created model allows to carrying out quickly modeling and optimization of operational characteristics of FOTS from various semiconductor materials.

A theoretical analysis of the influence of fluctuations in the density and thickness of the SE on the accuracy of FOT temperature measurements will also be performed. It is shown that this impact is significant and requires a clear control of the technological conditions for the manufacture of SE with individual certification of each SE, which is installed in the FOTS. The function of temperature sensitivity of FOTS on the basis of semiconductor chalcogenide glasses is explicitly obtained. It is shown that this option is only determined by the function of optical absorption material SE $\alpha(h\nu, T)$ and the thickness of the SE. Analysis of the temperature behavior of the sensitivity shows that the range of measured temperatures of FOTS based on glass $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$ should be limited to the range from 270 K to 430 K. Within this range, the sensitivity of FOTS is maximum and approximately constant. Outside the specified interval sensitivity decreases sharply.

The influence of spectral instability of the parameters of the optical path of FOTS on its sensitivity is analyzed. It was found that for optimal operation the elements of the optical path of FOTS on the basis of semiconductor materials should

ensure the stability of the working wavelength of radiation at the level of its variation within a few nanometers. Theoretical studies of the spectral and temperature stability of the radiation source parameters indicate the need for thermal stabilization of the LED unit to ensure high sensitivity and accuracy of FOT measurements.

The structural scheme for the experimental stand for researches of operational parameters of FOTS is developed in the work. Experimental studies with the help of the created model of the FOT transfer characteristic of the FOTS based on $As_{45}Se_{55}$ glass in the form of the dependence of the photodetector voltage on the SE temperature showed its behavior, very close to linear. At the same time, a good correlation was found between the experimental parameters of the FOT model and the results of theoretical modeling of SE and FOTS based on $As_{45}Se_{55}$ glass.

Experimental studies of SEs made of $As_{45}Se_{55}$ chalcogenide glass performed in this work showed the repeatability, within the allowable error, of the transfer characteristics during cyclic heating and cooling of the SE's.

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових виданнях:

1. Турияница 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.
2. 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.
3. Igor Chychura. Fiber-optic temperature sensors with chalcogenide glass and crystalline sensing elements. Part of the book: Optical Fiber Applications. Chap. 7. (Open Access Books) 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89207>
4. 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.

Матеріали наукових конференцій:

1. Турияница. 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. Турияница 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. Турияница І.І., Чичура І.І., Бутурлакін О.П. Блок реєстрації волоконно-оптичного датчика 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. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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. р.

10. 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. р.
11. 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. р.
12. 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.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
SUMMARY	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	17
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)	26
1.1 Фізичні та експлуатаційні характеристики оптичних волокон	26
1.2 Основні типи волоконно-оптичних датчиків та волоконно-оптичних термометрів	28
1.2.1 Інтерферометричні волоконно-оптичні термометри	31
1.2.2 Волоконно-оптичні термометри на основі дифракційних ґраток	42
1.2.3 Волоконно-оптичні датчики температури з модуляцією інтенсивності випромінювання	46
1.3 Матеріали чутливих елементів для волоконно-оптичних датчиків з модуляцією інтенсивності випромінювання	51
Висновки до розділу 1	54
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	55
2.1 Технологія виготовлення кристалічних чутливих елементів	55
2.2 Технологічні дослідження методів одержання чутливих елементів із стекол As-Se	58
2.3 Формування чутливих елементів методом роздавлювання	65
2.4 Оптимізація методів експериментальних досліджень параметрів та характеристик чутливих елементів та волоконно-оптичних термометрів	70
Висновки до розділу 2	76
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ПОГЛИНАННЯ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ОПТИЧНИХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ І СХЕМ ТЕРМОМЕТРІВ	78

3.1 Дослідження спектрів пропускання кристалів GaP та GaAs	80
3.2 Встановлення оптимального для ВОДТ діапазону хімічних складів стекло системи As-Se	87
3.3 Теоретичний аналіз краю оптичного поглинання скла $As_{45}Se_{55}$	95
3.4 Вибір оптимального типу оптичної схеми волоконно-оптичних термометрів із напівпровідниковим чутливим елементом	101
3.5 Вибір елементів оптичного тракту для двоканальної оптичної схеми ..	105
Висновки до розділу 3.....	108
РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ І РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОМЕТРА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	
4.1 Розрахунок потужності випромінювання на вікнах фотодіодів	111
4.2 Розрахунок величини вихідного електричного сигналу фотодіодів ...	118
4.3 Аналіз впливу флуктуацій густини та товщини чутливого елемента на параметри термометрів	122
4.4 Аналіз чутливості ВОДТ	125
4.5 Вплив температурної та спектральної нестабільності параметрів оптичного тракту на чутливість ВОДТ	130
4.5.1 Вплив спектральної нестабільності параметрів оптичного тракту на чутливість ВОДТ	130
4.5.2 Аналіз спектральної та температурної стабільності джерела випромінювання	133
4.6 Експериментальні дослідження параметрів ВОДТ та оцінка їх експлуатаційних характеристик	139
Висновки до розділу 4	147
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	152
ДОДАТКИ А	150
ДОДАТОК Б	162
ДОДАТОК В	163

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

У роботі введено та використано наступні умовні скорочення:

ВОД	волоконно-оптичний датчик;
ВОДТ	волоконно-оптичний датчики температури;
ВОТ	волоконно-оптичний термометр;
ОВ	оптичне волокно;
ОР	оптоелектронний реєстратор;
ПВП	первинний вимірювальний перетворювач;
ТЧЕ	термочутливий елемент;
ЧЕ	чутливий елемент;
Δ	оптична різниця ходу хвиль;
λ	довжина хвилі;
k_d	коефіцієнт термічного розширення плівки;
d	товщина;
d_p	показник, що визначає площину паралельну товщині взірця;
E_g	ширина забороненої зони;
F	фаза оптичних хвиль;
h	постійна Планка;
k_d	коефіцієнт температурного розширення
k_f	фазовий коефіцієнт;
k_n	термо-оптичний коефіцієнт зміни показника заломлення;
l	відстань між об'єктами;
m	порядок дифракції;
n	оптичний показник заломлення;
$P(\lambda)$	інтегральна потужність світлового випромінювання;
r	коефіцієнт відбивання випромінювання;
s	період ґратки;

S	крутизна краю оптичного пропускання ЧЕ;
$S(\lambda)$	інтегральна чутливість світлового випромінювання
S_T	середня температурна чутливість ЧЕ;
t	час;
α	коефіцієнт поглинання;
β	коефіцієнт лінійного розширення
δ	зсув фази між двома послідовними відбитими в ЧЕ пучками;
ε	відносна зміна товщини
η	коефіцієнт пропускання волоконно-оптичного тракту;
θ	оптичний кут;
ν	частота випромінювання;
τ	коефіцієнт пропускання;
χ	чутливість ВОДТ;
χ_0	коефіцієнт теплового розширення;
A	константа матеріалу;
I	інтенсивність випромінювання;
T	температура;
ω	частота світла;

ВСТУП

У наш час сучасну промисловість неможливо уявити без автоматизованих систем керування. Складні технологічні процеси і технічні механізми потребують постійного контролю різноманітних параметрів процесів, що в них проходять. Моніторинг стану складних інженерних споруд та промислових систем є невід'ємною частиною їх повсякденної експлуатації. Для виконання подібного контролю потрібні датчики та системи контролю різних фізичних величин, таких як температура, механічні деформації, тиск і т.д.

Обґрунтування вибору теми дослідження. На ринку вимірювальних систем і датчиків домінуюче 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 (за даними компанії ASDReports: 892 мільйони доларів у 2018 році з щорічним приростом 10,8% по всім галузям промисловості [1]), 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 у нашому часі. 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, завадостійкість 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: тема № 0116U003323 «Прилади і системи екологічного моніторингу довкілля» (роки виконання: 2016-2018 р.); тема № 0119U101432 «Автоматизація та моделювання комплексних автономних електроенергетичних систем» (рік виконання: з 2019 р. по теперішній час).

Мета і завдання дослідження. Вирішення наукової задачі моделювання та оптимізації оптичних параметрів легованих кристалів GaAs та стекол системи 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 при проведенні досліджень вирішувались такі основні задачі:

- аналіз сучасного стану розробок волоконно-оптичних термометрів (ВОТ);
- оптимізація технології виготовлення оптичних ТЧЕ із напівпровідникових кристалів та стекел;
- експериментальні й теоретичні дослідження в широкому температурному діапазоні змін спектрів краю оптичного поглинання легованих кристалів GaAs та стекел системи As-Se і ТЧЕ на їх основі;
- моделювання й теоретичні дослідження оптичних параметрів та характеристик оптичних ТЧЕ із легованих кристалів GaP, GaAs та стекел системи As-Se;
- розробка, оптимізація параметрів та виготовлення експериментального стенду для досліджень експлуатаційних параметрів ТЧЕ;
- експериментальні дослідження оптичних ТЧЕ та порівняльний аналіз їх результатів із теоретичними та модельними даними.

Об'єктом досліджень дисертації – є оптичні процеси на краю поглинання напівпровідникових кристалів і стекел та у ВОДТ на їх основі в умовах зміни температури навколишнього середовища.

Предмет дослідження – 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 дисертації:

- аналіз фізичних основ функціонування та принципів побудови ВОДТ на основі напівпровідникових матеріалів;
- технологічні методи формування ТЧЕ із стекел системи As-Se;
- спектральні методи визначення параметрів краю поглинання напівпровідників та його зсуву при варіюванні температури в широкому діапазоні;
- методи оптимізації конструкції та фізичних параметрів ВОДТ на основі напівпровідникових кристалів та стекел;
- моделювання поведінки краю поглинання ТЧЕ при зміні їх температури;

- фотоелектричні методи реєстрації інформаційних сигналів від ВОДТ;
- методи оптимізації електроніки блоку обробки сигналів від ВОДТ.

Наукова новизна одержаних результатів полягає:

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 ВОДТ.

2. Вперше на основі результатів експериментальних досліджень для області краю поглинання визначено числові параметри функції коефіцієнта оптичного поглинання кристалів GaP, GaAs та стекол As₄₅Se₅₅, залежної від двох змінних: енергії фотонів випромінювання та температури. На базі отриманої функції розроблено фізичні основи створення ТЧЕ зважаних 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 As₄₅Se₅₅.

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 (біля 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 As₄₅Se₅₅. 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 і 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 оптимізованих 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 дисертаційної роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях:

- 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-ій Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Технічне регулювання, метрологія та якість виклики сучасності». ОДАТРЯ (м. Одеса, 2017 р.);
- 73-ій 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-ій 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.).

Обсяг і структура дисертації

Дисертаційна робота викладена на 165 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних

джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 125 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 13 таблицями, 73 рисунками. Список використаних джерел містить 84 найменування, з них 45 кирилицею та 39 латиницею.

РОЗДІЛ 1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ (ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ)

1.1 Фізичні та експлуатаційні характеристики оптичних волокон

Існує велика кількість різноманітних приладів для вимірювання температури, серед яких важливе місце починають займати волоконно-оптичні термометри (ВОТ) [2]. Головною особливістю таких приладів є використання оптичних волокон (ОВ) в якості каналу передачі матеріального носія інформації до чутливого елемента (ЧЕ) та сигналу від ЧЕ до вимірювального перетворювача. Зрозуміло, що інформаційним носієм в датчиках таких приладів є оптичне випромінювання. Тому такі датчики температури отримали назву волоконно-оптичні датчики температури (ВОДТ). У них ЧЕ перетворює температуру, при якій він знаходиться, у зміну інформаційних параметрів оптичного випромінювання, яке через нього пройшло, розсіялося або відбилося від його поверхні.

Функціонування сучасних ВОДТ забезпечується особливостями поширення оптичного випромінювання в оптичному волокні. Принцип роботи оптичних волокон детально описаний у роботах [3,4].

При розробці сучасних ВОДТ слід брати до уваги експлуатаційні і фізичні параметри та характеристики оптичних волокон, які будуть прямо впливати на роботу проєктованих пристроїв. Дані характеристики для окремих ОВ можна розділити на кілька груп [5]. Наведемо основні із цих параметрів.

Характеристики передачі та оптичні характеристики:

- згасання - явище, що виникає в ОВ при розповсюдженні світла, яке обумовлює зменшення потужності світлової хвилі на виході ОВ по відношенню до її потужності на вході;
- коефіцієнт згасання – параметр, що обумовлений власними втратами в ОВ і додатковими втратами, що виникають в результаті виробництва оптичного волокна, збирання і прокладання оптичних кабелів;

- втрати в стиках при з'єднанні кількох ОВ- це додаткові втрати, що виникають у роз'ємних та нероз'ємних з'єднаннях ОВ при побудові оптичних ліній;
- дисперсія – явище, що призводить до збільшення тривалості імпульсів, котрі передаються вздовж волокна. Дисперсія має розмірність часу і визначається як середньоквадратична різниця тривалості імпульсу на виході і вході волокна;
- смуга пропускання – на відміну від класичних систем зв'язку в ОВ характеризує теоретичну ширину спектра сигналу, який може бути переданий по даному ОВ;
- довжина хвилі нульової дисперсії – довжина хвилі при якій хроматична дисперсія рівна нулю;
- числова апертура – синус максимального кута падіння променя по відношенню до осі волокна при якому промінь входить у волокно і далі поширюється у середині волокна;
- діаметр модового поля (для одномодового ОВ) – характеризує частину ОВ у якій передається найбільша кількість світлової енергії;
- критична довжина хвилі (для одномодового ОВ) – найбільша довжина хвилі моди, яка може розповсюджуватися у волокні заданої ширини.

Геометричні характеристики:

- довжина ОВ, відстань до місця пошкодження або неоднорідності;
- діаметри серцевини, оболонки, захисного покриття, розміри елементів конструкцій із оптичних волокон;
- ексцентриситети серцевини стосовно оболонки і захисного покриття, відхилення від круглої форми поперечного перерізу серцевини, оболонки і захисного покриття.

Механічні характеристики:

- допустимі зусилля розтягу і роздавлення;
- допустиме число закручувань і допустимий радіус вигину;

- стійкість до ударів і вібрацій;
- допустимий стиск симетричний осям (для підводних оптичних кабелів).

Кліматичні і експлуатаційні характеристики:

- стійкість до високих і низьких температур , пожежостійкість;
- стійкість до дії вологи і агресивних середовищ;
- радіаційна стійкість;
- герметичність.

1.2. Основні типи волоконно-оптичних датчиків та волоконно-оптичних термометрів

Волоконно-оптичні датчики (ВОД) можна розділити на дві великі групи: датчики з ОВ в якості лише лінії передачі випромінювання та датчики з ОВ, яке виконує роль чутливого елемента. Датчики другої групи, у свою чергу, можна розділити на кілька типів у залежності від того, який параметр оптичної хвилі використовується для накладання інформації про вимірювану величину. Основними із таких інформаційних параметрів є інтенсивність, фаза, стан поляризації, спектральний та модовий склад випромінювання.

За принципом роботи та конструктивними особливостями для ВОД можна запропонувати таку класифікацію:

1. Оптопарі з відкритим каналом. Дані оптопарі розміщуються таким чином, що їхній канал заповнюється контрольованим середовищем або проміжним чутливим елементом.

2. ОВ, які розміщуються в контрольованому середовищі і оптичні властивості яких змінюються під впливом змін фізичних властивостей цього середовища.

3. Інтегральні оптичні датчики, у яких в якості чутливого елемента використовують планарний світловод, виготовлений методами планарної хвилеводної технології. Принцип роботи таких датчиків засновано на явищі порушення умови повного внутрішнього відбивання променя, який

поширюється у світловоді, за рахунок змін властивостей оточуючого світловод середовища. Це обумовлює зміни інтенсивності випромінювання в світловоді за рахунок змін його втрат на межі розділу світловода і контрольованого середовища.

4. Датчики з волоконно-оптичним зв'язком, у яких чутливий елемент розміщено в місці розриву оптичного волокна. Цей чутливий елемент при дії на нього вимірюваної величини змінює свої оптичні властивості і тим самим впливає на параметри випромінювання, яке поширюється у волокні.

5. Датчики з чутливим елементом у вигляді волоконної ґратки брегівського типу. Під дією контрольованого параметру змінюються властивості такої ґратки, а, відповідно, і умови інтерференції випромінювання на ній.

За принципом кодування випромінювання у ВОД їх умовно можна розділити на такі великі групи:

- фазові датчики, у яких використовується високо-когерентне джерело випромінювання і вимірюється фаза світлової хвилі, яка змінюється під впливом зовнішнього параметру;
- датчики зі спектральним кодуванням, у яких використовуються джерела випромінювання з широким спектром та аналізуються зміни усього цього спектру на виході ВОД;
- амплітудні датчики, у яких вимірюваний параметр модулює інтенсивність світлових хвиль, які розповсюджуються у волокнах;
- тунельні датчики, у яких використовується ефект тунелювання випромінювання, яке проходить через малу щілину у світловоді;
- поляризаційні датчики, у яких аналізується інформація про поляризацію вихідної світлової хвилі.

Фазові датчики достатньо розповсюджені лише в лабораторних установках. Це пов'язано з необхідністю точного юстування таких приладів, а також з наявністю в їхньому складі додаткових фазо-налагоджувальних схем,

що сильно ускладнює конструкцію. Окрім того, дані датчики не дозволяють здійснювати вимірювання абсолютних значень контрольованих величин.

Датчики зі спектральним кодуванням найбільш перспективні з точки зору їх впровадження у промисловість завдяки стійкості до впливу різноманітних паразитних параметрів: дрейфу потужності випромінювання джерела, неконтрольованих втрат потужності у волокні, втрат при стикуванні волокон за допомогою конекторів та ін. Окрім того, датчики даного типу дозволяють проводити вимірювання абсолютних, а не відносних величин різних параметрів та не потребують перекалібрування після кожного ввімкнення приладу. Прилади на основі датчиків зі спектральним кодуванням вважаються складними та досить дорогими, оскільки містять спектрометр та засоби обробки оптичного зображення. Але на сьогодні, завдяки здешевленню технології прийому оптичного зображення пристроїв обробки оптичного спектру та мікропроцесорної техніки, ціни на дані прилади суттєво знижуються.

Амплітудні датчики мають свою область застосування, обумовлену їх дешевизною. Але, у зв'язку з невисокою точністю проведення вимірювань та наявністю дрейфу параметрів, вони не знаходять широкого застосування у високоточних вимірювальних системах. Однак, вони є перспективними датчиками для вимірювань, у яких не потрібна висока точність, наприклад, у якості лічильників обертів, мікрофонів, датчиків розподілу температури тощо.

Тунельні датчики є високочутливими приладами, але в них також присутній дрейф параметрів. Тому вони знаходять обмежене застосування переважно у високоточних пристроях позиціонування, мікрофонах, гідрофонах і т.д.

Комерціалізації поляризаційних датчиків, в основному, заважає необхідність використання дорогого ОВ із властивістю збереження поляризації.

У додатку А приведена порівняльна характеристика волоконно-оптичних технологій, які використовуються у вимірювальній техніці, а у додатку Б приведено загальну класифікацію та характеристики ВОДТ.

Розглянемо основні типи волоконно-оптичних термометрів.

1.2.1 Інтерферометричні волоконно-оптичні термометри

Класичний інтерферометр Фабрі-Перо складається з двох скляних або кварцових пластин P_1 і P_2 (рис. 1.1), на добре відполірованих внутрішніх поверхнях яких нанесені покриття з високим коефіцієнтом відбивання. Простір між такими пластинами можна розглядати як плоскопаралельну повітряну пластину. Якщо зовні на таку систему падає оптичне випромінювання, то, за рахунок багатократних відбивань між пластинами, формується множина когерентних хвиль, інтерференція яких дає у фокальній площині лінзи L інтерференційну картину у вигляді концентричних інтерференційних кілець рівного нахилу. Просторовий розподіл цих кілець залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання, відстані між пластинами l та від кута під яким вхідний промінь падає на інтерферометр. При зміні кожного із цих параметрів відбувається зміщення інтерференційних кілець, що й використовується для вимірювань температури термометрами на основі даного інтерферометра.

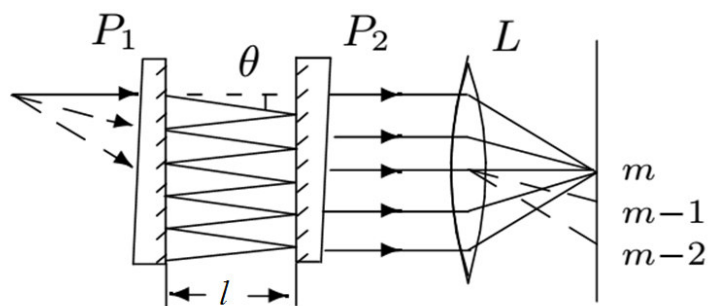


Рис. 1.1. Оптична схема інтерферометра Фабрі-Перо [6]

Зрозуміло, що в таких термометрах застосовують датчики з волоконно-оптичним зв'язком і чутливим елементом – інтерферометром, розміщеним у місці розриву оптичного волокна. Методи виготовлення волоконно-оптичних термометрів на основі інтерферометра Фабрі-Перо дуже різноманітні - від складної зборки з полірованого кварцу до осадження тонкого шару дзеркала на

кінці волокна. У найпростішому випадку інтерферометр створюють за допомогою розпірки (рис.1.2)

На рис 1.2 представлені два датчика температури. У цих датчиках використовується «розпірка». У схемі на рис. 1.2а розпірка знаходиться в безпосередньо в світловоді і при зміні температури впливає на оптичну відстань, як за рахунок зміни товщини, так і за допомогою зміни показника заломлення. На рис. 1.2б показана схема з розпіркою, що впливає тільки на відстань проходження променя через зміну своєї товщини.

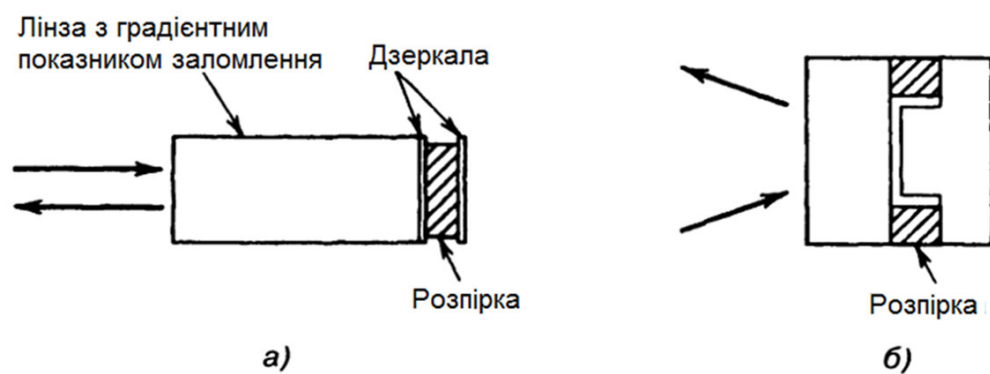


Рис. 1.2. Датчик температури, що використовує розширення бази інтерферометра для реєстрації зміни температури [7]

На рис. 1.3 представлений датчик температури на основі інтерферометра Фабрі-Перо. Датчики виготовлені з використанням технології інтегральних схем. Зазвичай габаритний розмір датчика складає $0,5 \times 0,5 \times 0,2$ мм.

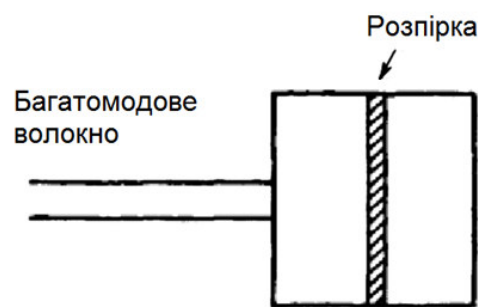


Рис. 1.3. Волоконно-оптичний датчик Фабрі-Перо для вимірювання температури [7]

У інтерферометричних датчиках може використовуватися один фотодіод, як зчитувач рівня сигналів, але ефективність такого датчика буде

обмежена. Високоточна система зчитування може бути виготовлена з використанням великої кількості фотодіодів та дисперсійної оптики, що забезпечує зменшення шумів і лінійність режиму при багатьох циклах зміщення інтерферометра.

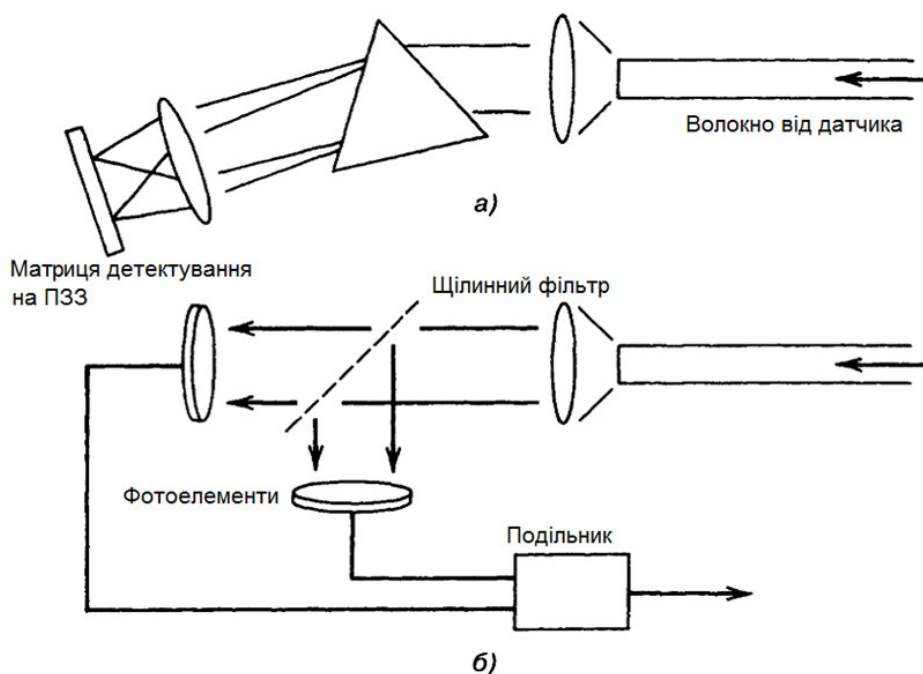


Рис. 1.4. Будова зчитуючих пристроїв для датчика температури Фабрі-Перо: а) з детекторною матрицею на ПЗЗ;
б) з фільтром та двома фотодіодами [7]

Приклад зчитувача, що складається з багатьох фотодіодів, показаний на рис. 1.4а. Світло від датчика потрапляє на матрицю фотодіодів, яка забезпечує безпосереднє зчитування оптичного спектру. На рис. 1.4б наведена спрощена схема такого пристрою, тут показані тільки два приймача, причому на кожен з них потрапляє половина оптичного спектру. При відповідному виборі джерела і оптичних властивостей датчика цей простий пристрій може забезпечити надійне зчитування в лінійному режимі. Інші пристрої зчитування для багатомодових датчиків Фабрі-Перо включають в себе інтерферометри з сервоприводом і джерела з двома довжинами хвиль, що декодуються пристроєм зчитування.

В одномодових датчиках Фабрі-Перо, як правило, застосовуються лазерні джерела випромінювання, а інтерферометр може знаходитися всередині самого волокна. Використання лазерного джерела забезпечує мініатюризацію і різноманітність конструктивного виконання таких датчиків, що неможливо забезпечити в разі використання багатомодових інтерферометричних датчиків. Проте в цілому одномодові системи конструювати складніше. На рис. 1.5 представлений варіант датчика температури - інтерферометр, якого знаходиться в одномодовому волокні. В такому волокні розташовуються дзеркала у вигляді напилених тонких плівок або використовується явище Френелівського відбивання. У внутрішньо-волоконному інтерферометрі для вимірювання температури використовуються ефекти, що були вперше описані Хоккером [7].

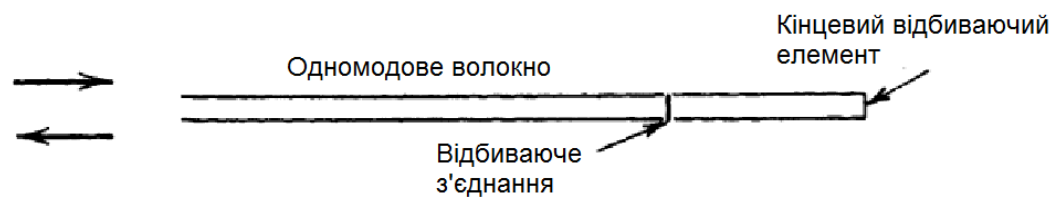


Рис. 1.5. Волоконно-оптичний датчик температури на основі одномодового інтерферометра [7]

За деякими винятками внутрішньо-волоконні інтерферометри Фабрі-Перо принципово відрізняються від інтерферометрів Маха-Цендера. Інтерферометру Фабрі-Перо необхідна відповідна довжина плеча інтерферометра, що залежить від температури. Довжина резонатора повинна бути набагато більшою, ніж довжина когерентності випромінювання лазера. Для датчиків на інтерферометрах Фабрі-Перо з високою добротністю застосовують спеціальні методи зчитування, через їх нелінійності.

Для високоточних систем вимірювання температури на основі інтерферометра Майкельсона використовують різні схеми: один або кілька фото-приймальних пристроїв, які реєструють зсув інтерференційних ліній. У такі системи можуть вбудовуватися двигуни, наприклад, як на рис. 1.6. У цьому

вимірювальному пристрої випромінювання лазера з довжиною хвилі червоного кольору падає на два фотоприймальних пристрої.

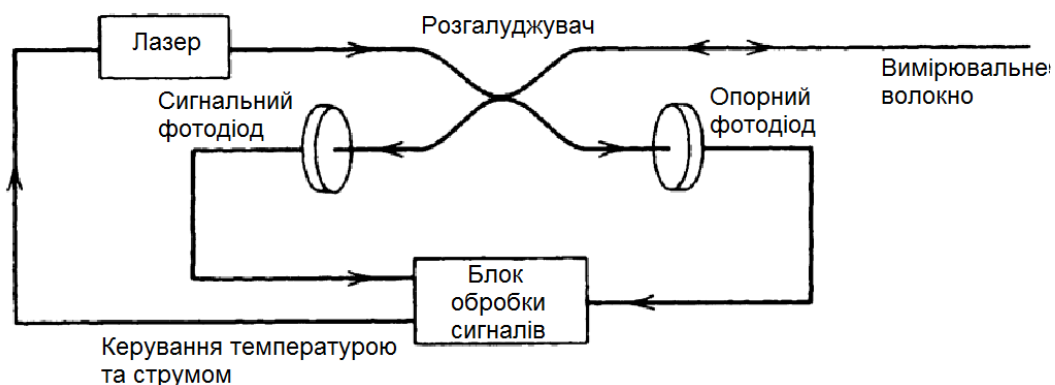


Рис. 1.6. Волоконно-оптичний вимірювальний пристрій, що працює за принципом інтерферометра Фабрі-Перо [7]

У таких вимірювальних системах на основі інтерферометра допускається використання лазерного джерела з малою довжиною когерентності. Корисним для певних умов застосування, таких вимірювачів є додавання в систему спеціальних волокон з поляризацією, які дозволяють одночасно проводити вимірювання двох пов'язаних між собою параметрів, таких як механічна напруга і температура [11-13].

Багатомодові волоконно-оптичні вимірювачі на основі інтерферометра мають меншу чутливість, у порівнянні з одномодовими. Як правило, в промислових умовах не потрібна висока чутливість. Наприклад, багатомодові датчики температури, що випускаються «MetriCor», мають роздільну здатність 0,1 К. Одномодовий інтерферометричний датчик температури десяти сантиметрової довжини може мати роздільну здатність 10^{-5} К, якщо врахувати значення Хокера для чутливості волокна до температури рівної $100 \text{ рад К}^{-1}\text{м}^{-1}$, то чутливість інтерферометра складає 10^{-4} рад.

Для більшості тонких плівок напівпровідників характерні помітні температурні зміни показника заломлення з величиною $\frac{dn}{dT}$ більше 10^{-4} К^{-1} . Це дозволяє застосовувати їх як матеріали інтерферометричних ВОДТ. Зокрема, у

роботі [8] показано, що для резонаторів Фабрі-Перо особливо ефективними є ЧЕ на основі тонких нанокристалічних SiC-плівки, осаджених на кварцові або лейкосапфірові підкладки. Для їх нанесення використовують метод прямого іонного осадження з плазмовим джерелом іонів (енергія біля 90 еВ) при високих температурах підкладки (біля 900°C). Результати дослідження оптичних спектрів відбивання таких плівок SiC різної товщини наведені на рис.1.7 (підкладка з лейкосапфіру).

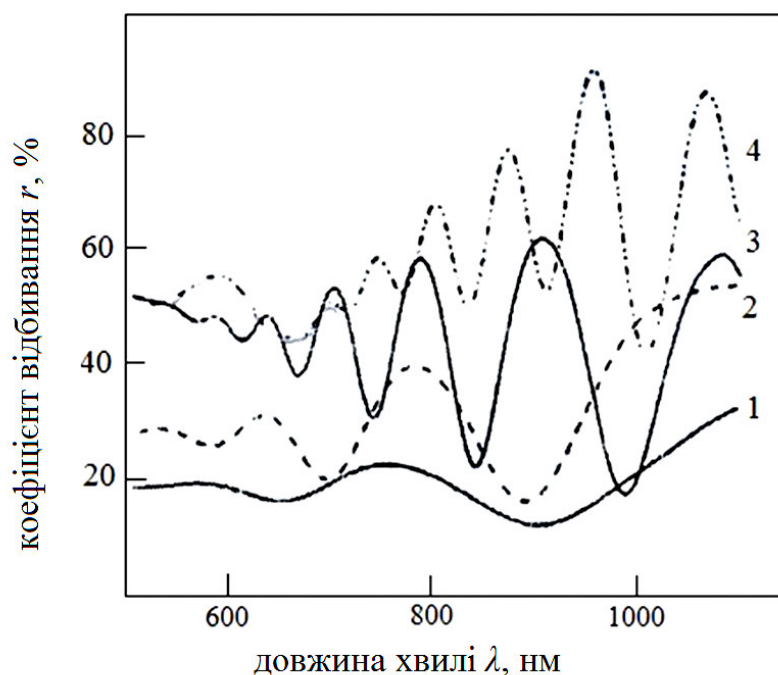


Рис. 1.7. Спектри відбивання плівок SiC різної товщини із роботи [8]: товщини півки 1 – 0,6 мкм; 2 – 1,4 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3,34 мкм

Як слідує із даних спектрів, при товщинах півки, співрозмірних з довжиною робочої хвилі оптичного тракту в області кількох мікрометрів, одержується стійка інтерференційна картина. Це свідчить про те, що верхні і нижні поверхні SiC-півки можна вважати дзеркалами інтерферометра Фабрі-Перо (див. схему на рис.1.8).

На рис. 1.8: 1 – спектрометр; 2 – ОВ; 3 – узгоджуючі лінзи; 4 – плоскі дзеркала; 5 – фільтр, що відсікає ІЧ-випромінювання; 6 – фотоприймач; 7 – комп'ютер; 8 – інтерферометр Фабрі-Перо; 9 – нагрівач; 10 - термопара для

контролю температури; θ_0 і θ'_0 - кути падіння та відбивання; θ_1 - кут заломлення; n – показник заломлення [8].

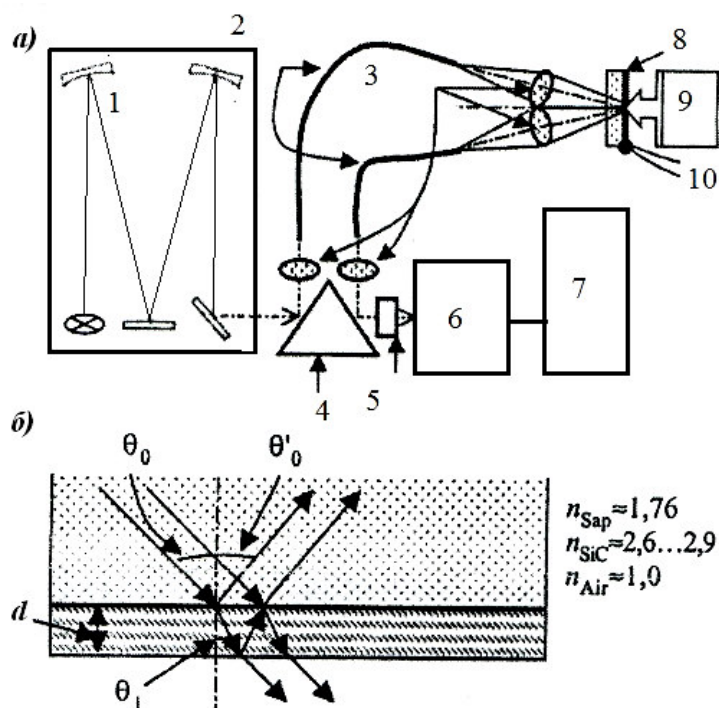


Рис. 1.8. Схема оптичного тракту ВОТ на основі плівкового інтерферометра Фабрі-Перо (а) та формування інтерференційної картини в ньому (б)

Як видно із наведеної схеми, для двох сусідніх променів, які поширюються між дзеркалами під кутом θ , оптична різниця ходу хвиль визначається співвідношенням [8]:

$$\Delta = 2n(\lambda, T) \cdot d(T) \cos \theta_i, \quad (1.1)$$

де n – показник заломлення плівки SiC, який змінюється з температурою;

d – товщина плівки, яка теж змінюється з температурою;

θ_i – кут заломлення променів у плівці.

Отриманій оптичній різниці ходу відповідає певна зміна фази оптичних хвиль ΔF . У роботі [8] температурна залежність даної величини визначена як

$$\frac{\Delta F}{\Delta T} = 2\pi n d k_f / \lambda, \quad (1.2)$$

де $k_f = k_n + k_d$;

k_n – термооптичний коефіцієнти зміни показника заломлення $\frac{\Delta n}{\Delta T_n}$;

$k_d = \frac{\Delta d}{\Delta T d}$ – коефіцієнт термічного розширення плівки.

З останньої формули видно, що температурні зміни фази хвилі у ВОДТ на основі інтерферометрів Фабрі-Перо прямо пропорційні товщині ЧЕ, його показнику заломлення та сумі його термооптичного коефіцієнта і коефіцієнта термічного розширення. Врахувавши, що для плівок SiC $k_n \gg k_d$, можна записати:

$$\frac{\Delta F}{\Delta T} = \frac{2\pi d}{\lambda_m(T_0)} \cdot \left\{ \frac{1}{\lambda_m(T_0)} \left(\frac{\Delta \lambda_m}{\Delta T} \right) \right\}, \quad (1.3)$$

де $\lambda_m(T_0)$ – довжина хвилі максимуму інтерференції m -го порядку при температурі T_0 ;

$\Delta \lambda_m$ – зсув максимуму інтерференції при нагріванні ЧЕ.

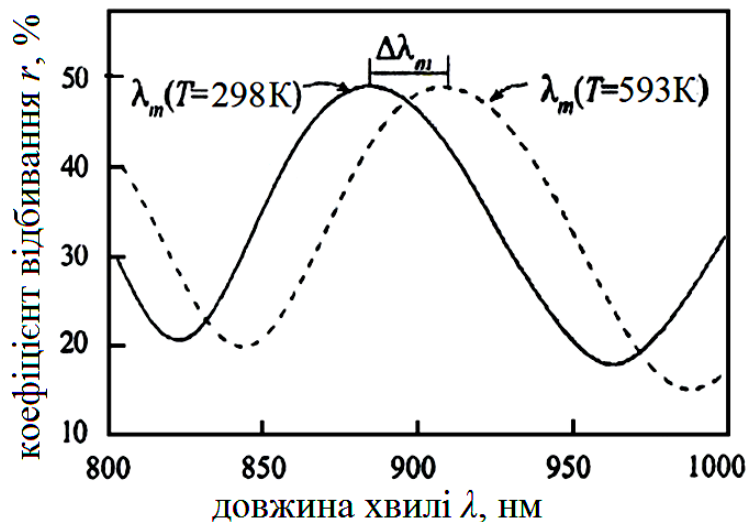


Рис. 1.9. Зсув максимуму інтерференційної картини ВОДТ на основі інтерферометра Фабрі-Перо при нагріванні тонкоплівкового ЧЕ із SiC (товщина 2 мкм) [8]

Таким чином, температурні зміни показника заломлення і товщини ЧЕ зі зміною температури приводять до змін положення максимумів інтерференційної картини (рис.1.9). При цьому зміна фази відбитої хвилі пропорційна зсуву максимуму інтерференції при зміні температури ЧЕ.

Передавальна характеристика ВОДТ на основі інтерферометра Фабрі-Перо із плівковим ЧЕ SiC наведено на рис.1.10. Видно, що спектральний фазовий зсув при змінах температури такого ЧЕ добре апроксимується лінійною функцією, що є позитивною рисою таких пристроїв. Автори [8] також вважають, що ЧЕ із плівок SiC забезпечують вимірювання температури до верхньої межі біля 1300 К.

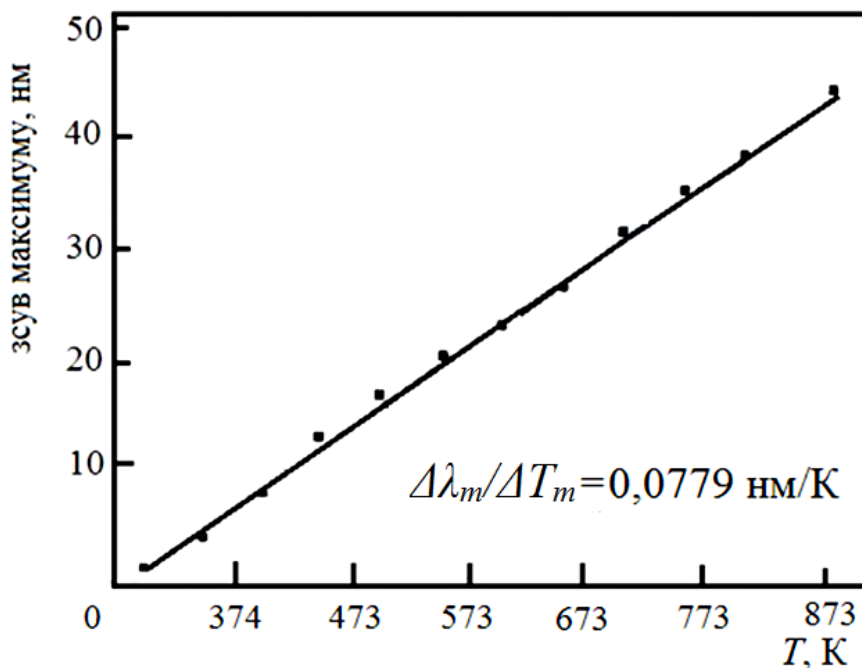


Рис. 1.10. Експериментальна передавальна характеристика ВОДТ на основі інтерферометра Фабрі-Перо із плівковим ЧЕ SiC (суцільна пряма – результат лінійної апроксимації) [8]

Деякі напівпровідникові плівки можна наносити безпосередньо на торець ОВ. Якщо матеріал такої плівки має великий коефіцієнт заломлення, то коефіцієнт відбивання від її поверхонь буде значним. У результаті при направленні з ОВ у плівку світлового променя в її об'ємі формуватиметься система інтерферуючих між собою хвиль і відповідна інтерференційна картина (рис.1.9). Дана картина буде змінюватися із зміною температури плівки відповідно до температурних змін її показника заломлення, що дозволяє застосовувати і такі плівки в якості ЧЕ інтерферометричних ВОТ [9].

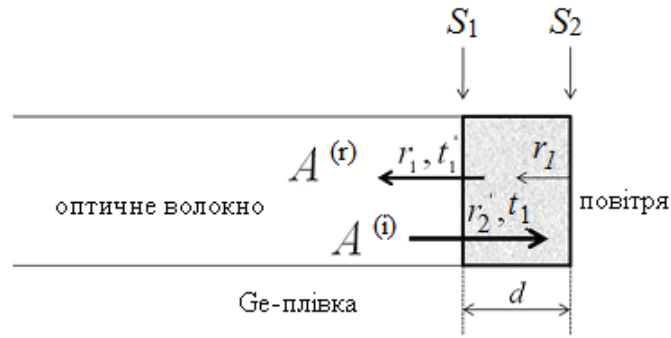


Рис. 1.11. Структурна схема ВОДТ з плівкою на торці ОВ [9]

Оптимальними для таких застосувань є тонкі плівки германію з товщиною біля 1 мкм, які в області своєї оптичної прозорості мають велике відбивання. Для його визначення слід враховувати багатократне відбивання та поглинання матеріалом плівки в області прозорості, параметри якого відмічені на рис.1.11 як:

S_1, S_2 – поверхні розділу плівки та ОВ і плівки та повітря;

r_1, t_1 – коефіцієнти відбивання і пропускання випромінювання на поверхні S_1 , коли промінь вводиться в ЧЕ з ОВ;

r_1', t_1' - коефіцієнти відбивання і пропускання на поверхні S_1 , коли промінь входить в ОВ із ЧЕ;

r_2 - коефіцієнт відбивання випромінювання на поверхні S_2 ЧЕ.

Для плівок германію коефіцієнт термічного розширення більш ніж на порядок перевищує коефіцієнт температурної залежності відбивання, тому змінами товщини ЧЕ можна знехтувати.

Амплітуду сумарної відбитої від ЧЕ хвилі в цьому випадку можна записати як:

$$A^{(r)} = (r_1 + t_1 t_1' r_2 e^{-2\alpha d} e^{i\delta} + r_1' t_1 t_1' r_2^2 e^{-4\alpha d} \cdot e^{i2\delta} + r_1^2 t_1 t_1' r_2^3 \cdot e^{-6\alpha d} e^{i3\delta} + \dots) A^{(i)}, \quad (1.4)$$

де $A^{(i)}$ – амплітуда падаючої хвилі;

d – товщина ЧЕ;

δ - зсув фази між двома послідовними відбитими в ЧЕ пучками.

Тоді коефіцієнт відбивання ЧЕ може бути записаний наступним чином:

$$r = r_1 + t_1 t_1' r_2 e^{-2\alpha d} e^{i\delta} (1 + r_1' r_2 e^{-2\alpha d} e^{i\delta} + r_1'^2 r_2^2 e^{-4\alpha d} e^{i2\delta} + \dots) = r_1 + \frac{t_1 t_1' e^{-2\alpha d} e^{i\delta}}{1 - r_1' r_2 e^{-2\alpha d} e^{i\delta}} \quad (1.5)$$

Врахувавши, що $r_1 = r_1'$, $t_1 = t_1'$ для поверхні S_{1i} і що $r_1 = -r_1'$ і $t_1 \cdot t_1' = 1 - r_1^2$ вираз (2.5) можемо записати:

$$r = r_1 + \frac{(1 - r_1^2) r_2 e^{-2\alpha d} e^{i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2\alpha d} e^{i\delta}} = \frac{r_1 + r_2 e^{-2\alpha d} e^{i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2\alpha d} e^{i\delta}} \quad (1.6)$$

Тому інтенсивність світла, відбитого від ЧЕ в ОВ $I^{(r)}$ дорівнює:

$$I^{(r)} = A^{(r)} \cdot A^{(r)*} \quad (1.7)$$

Одночасно відбивання від задньої стінки в волокно R:

$$R(T) = r \cdot r^* = \frac{r_1^2 + r_2^2 e^{-4\alpha d} + 2r_1 r_2^{-2\alpha d} \cos \delta}{1 + r_1^2 r_2^2 e^{-4\alpha d} + 2r_1 r_2 e^{-2\alpha d} \cos \delta} \quad (1.8)$$

Останній вираз враховує відбивання r_2 від поверхні S_2 (додатковий множник $e^{-2\alpha d}$). Він показує, що коефіцієнт відбивання ЧЕ є температурно-залежною функцією за рахунок температурних змін як його коефіцієнта відбивання на його поверхнях, так і коефіцієнта поглинання матеріалу ЧЕ (біля 40 % для плівок германію). На рис.1.12 представлено відбивання ЧЕ із плівки Ge як функція її товщини на довжині хвилі $\lambda = 1550$ нм для двох температур.

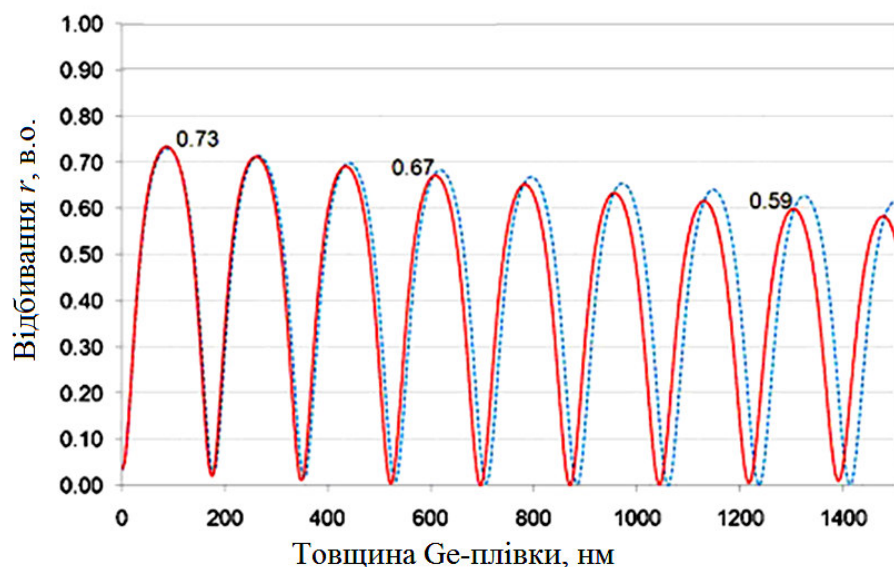


Рис. 1.12. Залежність коефіцієнта відбивання плівки германію на торці ОВ від товщини (суцільна лінія - при 373 К і пунктирна лінія - при 0 °С) [9]

Дослідження показали, що максимальна зміна відбивання в інтервалі температур 0 - 373 К спостерігається на досить товстих плівках. Але в таких ЧЕ різко зростає і величина поглинання. При цьому зміни коефіцієнта відбивання при зміні товщини ЧЕ є суттєво нелінійними. Оптимальними з точки зору чутливості та надійності вимірювань виявилися ЧЕ у вигляді плівок германію з товщиною до 1 мкм. Зокрема, для сенсора з товщиною ЧЕ 0,5 мкм чутливість складала $0,0012 \text{ K}^{-1}$ [9].

Потужність світлового променя, яка попадає на фотодіод такого ВОДТ дорівнює:

$$P(t) = \eta \cdot R(T)P_0, \quad (1.9)$$

де η – коефіцієнт пропускання волоконно-оптичного тракту;

P_0 – потужність введеного в ОВ випромінювання від джерела.

На рис.1.13 приведена теоретична залежність відбивання ЧЕ із плівки Ge від температури. Для розрахунків використовувалися параметри стандартних одномодових ОВ G652. Експериментальні дослідження показали хороше узгодження з даними теоретичних розрахунків, виявивши чутливість ВОТ до температури біля 0,1 К.

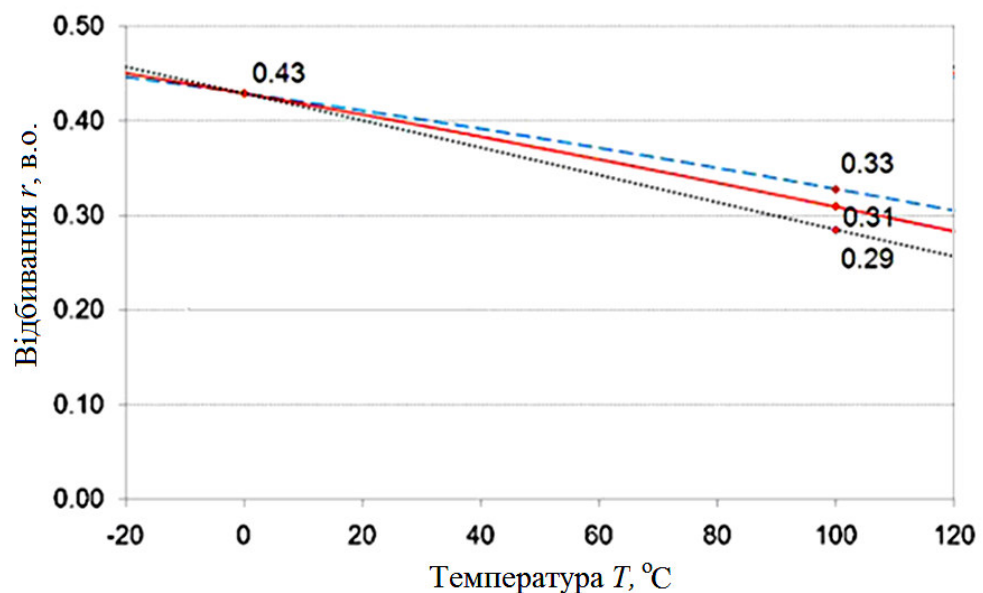


Рис. 1.13. Залежність коефіцієнта відбивання для плівки германію при $\lambda = 495 \text{ нм}$ від температури [9]

На рис.1.13: пунктирна лінія – поглинання в плівці відсутнє, штрих-пунктирна лінія – поглинання 100%, суцільна лінія – поглинання складає 40%.

Дослідження ЧЕ на основі плівок германію виявили і кілька проблем. Зокрема, відхилення товщини ЧЕ ± 5 нм, які можуть бути пов'язані з нестійкістю процесу осадження тонких плівок, призводять до варіації чутливості ВОДТ до 2 % та до змін відбивання ЧЕ до 6% (товщина ЧЕ біля 495 нм). Це вимагає калібрування кожного ЧЕ перед його встановленням у ВОТ. Крім того, спостерігаються значні розбіжності передавальних характеристик різних ВОДТ у низькотемпературній області, що може бути наслідком нелінійної залежності поглинання плівок германію від температури в різних діапазонах її змін.

1.2.2 Волоконно-оптичні термометри на основі дифракційних ґраток

Багато сучасних високоефективних волоконно-оптичних термометрів побудовані на основі дифракційних ґраток, які в останній час виготовляють за технологією резистів [10]. Їхній принцип дії базується на зміні періоду таких ґраток при зміні їх температури за рахунок теплового розширення матеріалу, з якого виготовлена ґратка. Відповідно буде змінюватися і дифракційна картина, сформована світловим променем, який проходить через дифракційну ґратку або відбивається від неї. За величиною таких змін вимірюють температуру середовища, у якому знаходиться ґратка. Зокрема, якщо у заданій структурі з ґраткою підкладка має коефіцієнт теплового розширення χ , то залежність періоду ґратки від температури буде визначатися формулою:

$$s = s_0[1 + \chi (T - T_0)], \quad (1.10)$$

де s_0 - період ґратки при температурі T_0 .

При освітленні дифракційної ґратки відбиваючого типу, яка містить почергово відбиваючі і поглинаючі смуги, світлом під постійним кутом θ_0 , розподіл смуг інтенсивності світла в дифракційній картині залежатиме від кута її реєстрації θ_1 та періоду ґратки s відповідно із співвідношенням (рис.1.14):

$$s (\sin \theta_0 + \sin \theta_1) = m \lambda, \quad (1.11)$$

де m - порядок дифракції.

Якщо період дифракційної ґратки змінюється відповідно зі змінами вимірюваної температури T за певним законом, який задається функцією $f(T)$, то можна зробити висновки про величину параметра P , коли відомо, що s (передбачено, що функція $f^{-1}(s)$ існує і однозначно визначена). В цьому випадку:

$$W = f^{-1} \frac{m \lambda}{\sin \theta_0 + \sin \theta_1}, \quad (1.12)$$

де W – параметр за яким модулюється період ґратки.

На основі дифракційних ґраток вже розроблено дослідні зразки ВОТ, які працюють або на принципах вимірювання змін інтенсивності дифракційної картини або на принципах визначення змін довжини хвилі дифрагованого випромінювання [11].

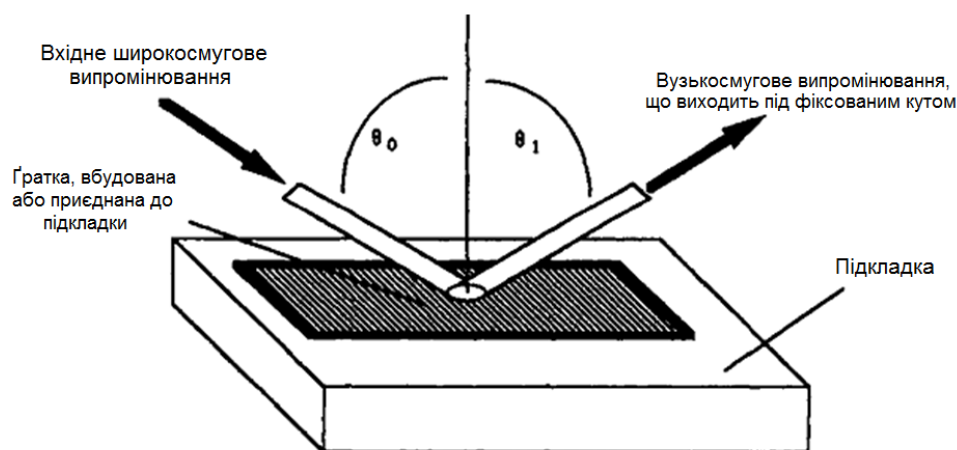


Рис. 1.14. Дифракція на відбиваючій дифракційній ґратці [7]

Одними із важливих типів ґраткових волоконно-оптичних приладів є також термометри, побудовані на основі об'ємних дифракційних ґраток Брегга. Вони представляють собою нанорозмірні волоконно-оптичні періодичні структури з періодом порядку сотень нм, які знаходяться безпосередньо в серцевині оптичного волокна [14]. Принцип роботи такого вимірювача заснований на залежності резонансної довжини хвилі λ_B волоконно-оптичної брегівської решітки від температури середовища, у якому вона знаходиться.

Зміна λ_B зумовлює варіацію довжини хвилі відбитого випромінювання, за величиною якої і визначають величину зміни температури (рис. 1.15).

На рис. 1.15 приведено типову схему ВОТ на основі бреггівської ґратки. Пристрій складається з джерела випромінювання, волоконно-оптичного розгалужувача через який світло проходить без перешкод у прямому напрямку та потрапляє на ЧЕ у вигляді волоконно-оптичної бреггівської ґратки. Повертаючись відбите світло знов потрапляє на волоконно-оптичний розгалужувач, де частина випромінювання передається на аналізатор спектру за яким і визначаються зміни у спектральному складі випромінювання, що відбулися у результаті зміни досліджуваного параметра.

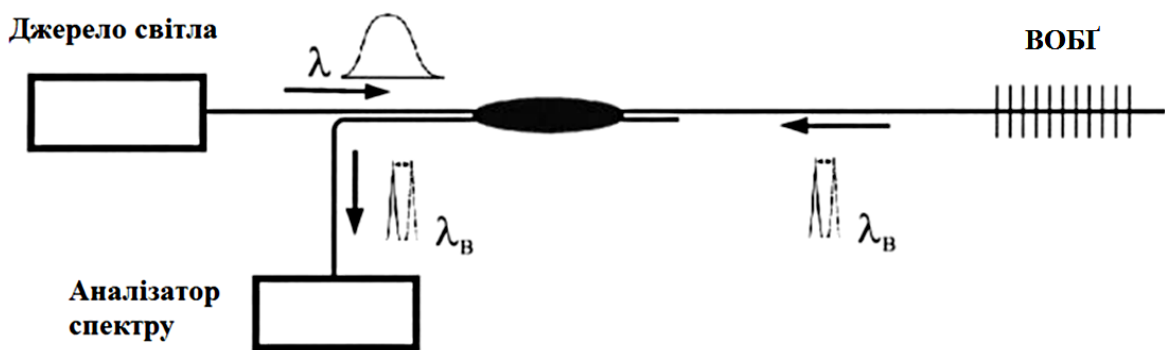


Рис. 1.15. Принципова схема ВОТ на основі ґраток Брегга (λ – довжина хвилі джерела світла, λ_B – довжина світла, що відбилося від бреггівської ґратки, ВОБГ – волоконно-оптична бреггівська ґратка [11])

Особливістю таких ВОТ є те, що їхній ЧЕ повністю діелектричний і в ньому відсутні будь-які електронні компоненти. Це дозволить ефективно використовувати дані прилади для вимірювання температури в зоні сильних електромагнітних перешкод та підвищеної вибухонебезпечності. Крім того, використання довжини хвилі світла в якості інформаційного параметра робить дані датчики нечутливими до довготривалих дрейфів параметрів джерела і приймача випромінювання, а також до випадкових згасань потужності оптичної моди у волокні. Однак ВОТ, які містять датчики Брегга, поступаються за

швидкодією іншим типам приладів, оскільки в них при вимірюванні відбувається досить тривалий процес частотного опитування датчиків.

Відмітимо, що в одному ОВ може бути встановлена велика кількість ґраток Брегга, кожна з яких даватиме оптичний сигнал на власній довжині хвилі. У такому випадку замість точкового датчика ми отримуємо розподілену систему реєстрації температури в багатьох технологічних точках із ущільненням інформації по довжині хвилі.

1.2.3 Волоконно-оптичні датчики температури з модуляцією інтенсивності випромінювання

Зміна інтенсивності випромінювання (або його амплітудна модуляція) в ЧЕ є найбільш зручною для подальшої обробки вихідного сигналу з ВОДТ. Це обумовлено тим, що у схемах амплітудної модуляції не вимагається використання когерентного випромінювання і не ставляться спеціальні вимоги до джерела та приймача випромінювання.

Зміна інтенсивності оптичного сигналу може бути реалізована за рахунок різних фізичних ефектів у ЧЕ:

- зміни коефіцієнта поглинання α середовища на фіксованій довжині хвилі випромінювання;
- зміни площі поперечного перерізу оптичного каналу;
- зміни коефіцієнта відбивання середовища ЧЕ (переважно за рахунок варіації його показника заломлення n);
- генерація додаткового випромінювання за рахунок зміни температури активного елемента датчика.

Зокрема, якщо у ВОДТ використовують температурну залежність положення краю поглинання матеріалу, то для більшості матеріалів при збільшенні температури ЧЕ інтенсивність світла, яка проходить через нього, буде зменшуватись. Відповідно, результуючий сигнал фотодіода, який реєструє інтенсивність випромінювання на виході оптичного тракту ВОТ буде змінюватися за законом, який подібний до наведеного на рис.1.16.

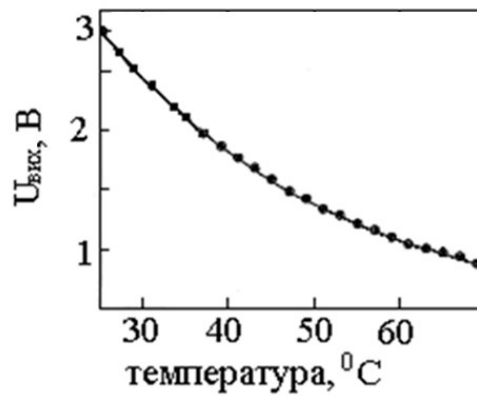


Рис. 1.16. Залежність вихідної напруги сенсора від температури [12]

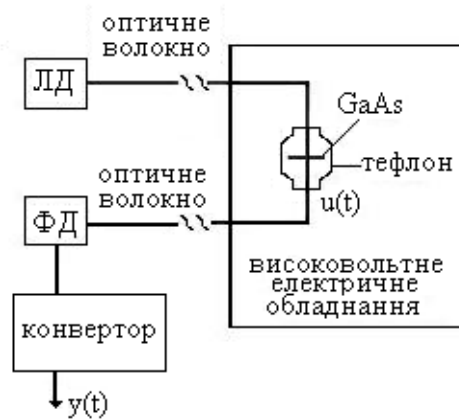


Рис. 1.17. Блок-схема ВОТ [13]

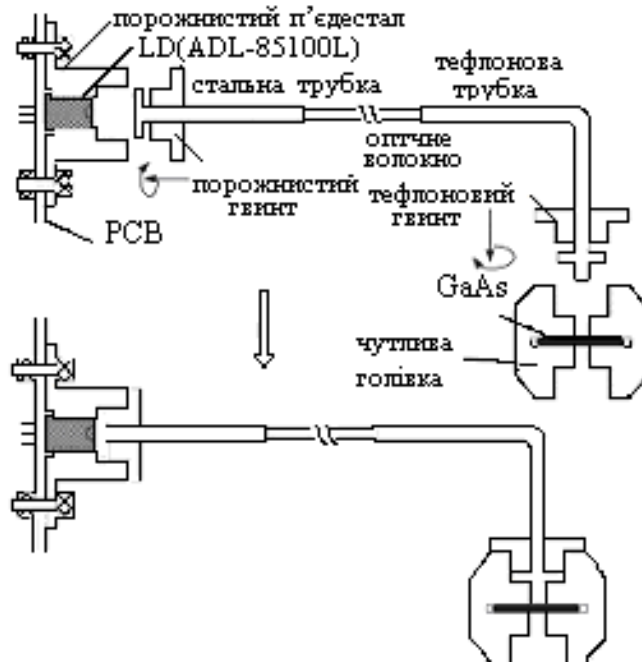


Рис. 1.18. Особливості оптичного тракту ВОТ [13]

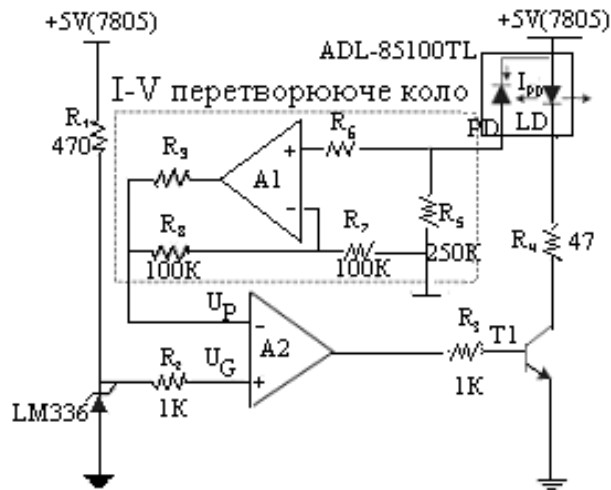


Рис. 1.19. Електрична схема блоку реєстрації пристрою [13]

Прикладом розробки ВОТ даного типу на основі напівпровідникового матеріалу GaAs є дослідження приведені у роботі [13]. Схема створеного авторами цієї роботи однохвильового одноканального пристрою для вимірювання температури середовищ з наявністю сильних електричних полів наведена на рис.1.17, а його конструкційні особливості – на рис.1.18 і 1.19.

Авторами [13] детально аналізується також методика метрологічного забезпечення ВОДТ з амплітудною модуляцією оптичного сигналу, приводяться результати експериментальних досліджень його статичних і динамічних характеристик. У результаті зроблено висновок про перспективність розробок аналогічних приладів з різними температурними діапазонами вимірювань для застосувань в різних «важких» умовах експлуатації.

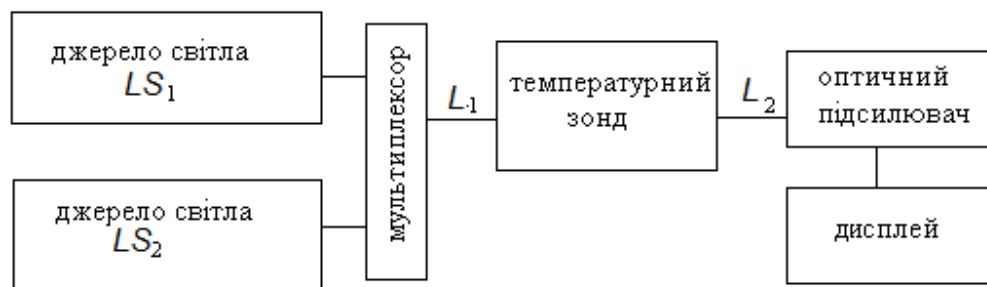


Рис. 1.20. Структурна схема оптичного тракту двохвильового двоканального ВОДТ [15]

З метою зменшення похибок вимірювань температури рекомендується застосовувати у ВОТ також двохвильові одноканальні оптичні тракти. Прикладом такої розробки на основі арсеніду галію є роботи [14, 15]. Структурна схема їхнього ВОДТ наведена на рис. 1.20.

Як видно, у наведеній двохвильовій компенсаційній схемі використовуються два джерела випромінювання (LS_1 та LS_2) з двома різними робочими довжинами хвиль:

- світлодіод IR940 з $\lambda = 950$ нм (пластинка GaAs для цієї довжини хвилі є прозорою), випромінювання якого з мінімальними втратами проходить через опорний канал без температурних змін інтенсивності;
- світлодіод IR880 з $\lambda = 880$ нм (знаходиться в області фундаментального поглинання GaAs), випромінювання якого використовується для контролю змін пропускання ЧЕ. Після почергового проходження сигналу через ЧЕ (що забезпечує мультиплексор) оптичний приймач реєструє відношення сигналів від двох джерел випромінювання, яке пропорційне зміні температури ЧЕ. На рис.1.21 наведена температурна залежність вихідного сигналу для такого ВОТ.

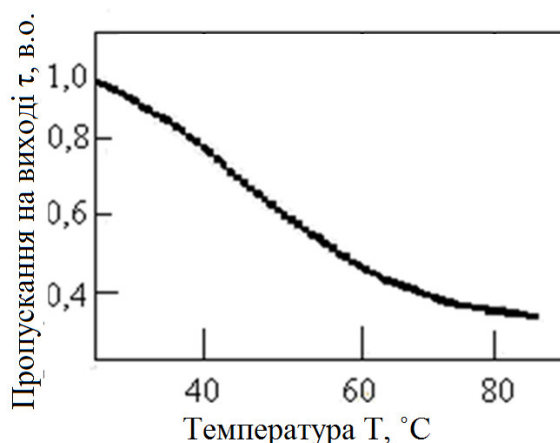


Рис. 1.21. Температурна залежність відношення сигналів від двох джерел випромінювання для двохвильового ВОТ [15]

У двохвильових схемах при вимірюваннях температури в ОВ почергово направляються періодичні імпульси світла від світлодіодів з робочою та опорною довжинами хвиль. Пройшовши через ЧЕ та відбившись від його

дзеркальної поверхні опорний та робочий промені попадають на фотодіод, який реєструє їхні інтенсивності. Одержані величини обробляються мікроконтролером, який знаходить відношення цих інтенсивностей. Зміни даного відношення залежать від температури ЧЕ відповідно з його передавальною характеристикою.

При вимірюваннях температури на значних відстанях від електронного блоку реєстрації розглянуті конструкції одно- та двоххвильового ВОТ мають суттєвий недолік: випромінювання має поширюватися до ЧЕ одним ОВ і повертатися назад іншим ОВ. Тобто, в оптичний тракт термометра входить два довгі відрізки ОВ. Більш практичними і дешевшими є системи, у яких до ЧЕ і від нього випромінювання поширюється по одному і тому ж ОВ. Одна із конструкцій даної системи для однохвильового ВОДТ запропонована в [14] (рис.1.22).

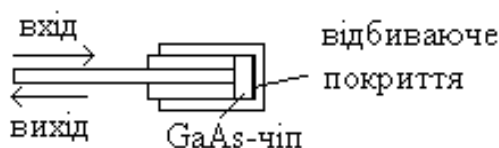


Рис. 1.22. Схема одноканального ВОДТ з одним ОВ [14]

У запропонованій конструкції ЧЕ служить відполірована пластинка із GaAs. На передню поверхню цієї пластинки нанесене просвітлююче покриття, а на задню – відбиваюче дзеркальне покриття. Такий ЧЕ прикріплюється до торця багатомодового ОВ і вся система вмонтовується в тонку трубку із неіржавіючої сталі. Завдяки дзеркальному покриттю зондуєчий промінь після проходження пластинки повертається назад в оптичний тракт пристрою.

ВОТ із одним ОВ можуть будуватися і за двоххвильовими оптичними схемами з двома джерелами випромінювання з різними довжинами хвиль (рис.1.23), аналогічними до розглянутої раніше. Такі схеми також забезпечують зменшення похибок вимірювання температури, обумовлених втратами в ОВ, на з'єднаннях та інших конструкційних елементах, оскільки робочий та опорний промені в них проходять практично один і той же шлях.

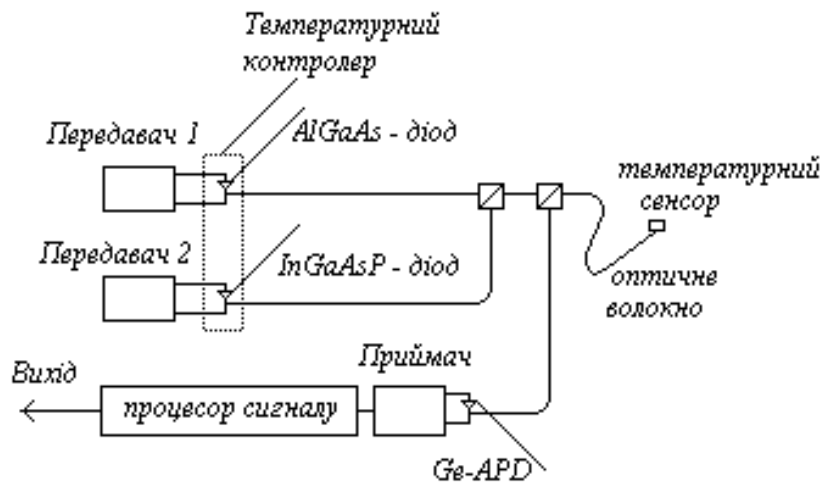


Рис. 1.23. Структурна схема двоканального сенсора [14]

У розробленому [14] двохвильовому ВОТ світлодіод із AlGaAs забезпечував випромінювання із робочою довжиною хвилі ($\lambda = 0,88$ мкм), а світлодіод із InGaAs – випромінювання опорної довжини хвилі ($\lambda = 1,3$ мкм). Такий ВОТ дозволив вимірювати температуру від -20°C до $+150^{\circ}\text{C}$ з точністю біля $0,5^{\circ}\text{C}$.

1.3 Матеріали чутливих елементів для волоконно-оптичних датчиків з модуляцією інтенсивності випромінювання

Крім вже розглянутих вище кристалів GaAs застосовують й інші напівпровідникові матеріали для виготовлення ЧЕ ВОДТ. Важливим із них є кремній, технологія виробництва високоякісних тонких пластин із якого товщиною в діапазоні 10 – 100 мкм та поперечним перерізом біля 150×150 мкм² добре розроблена. Для цього використовуються методи направленої плазмохімічного травлення і фотолітографії.

При виготовленні ВОДТ із таких мікропластин кремнію основні труднощі пов'язані із забезпеченням двох основних вимог:

- забезпечити хороший оптичний контакт, міцність і надійність з'єднання з оптичним волокном;

- витримати задане положення пластини по відношенню до торців волокна.

Дослідження виявили, що оптимальне виконання вказаних вимог забезпечує з'єднання кремнієвих мікропластин з ОВ методом зварювання в газовому розряді. Для цього розроблений макет лабораторної установки, який дозволяє здійснювати позиціонування пластин відносно торців ОВ з точністю ± 3 мкм. Після позиціонування і юстування мікропластини й волокна одне відносно одного проводився сам процес зварювання. На рис.1.24 наведена фотографія ЧЕ, отриманого даним методом: на ній мікропластинка кремнію товщиною 90 мкм розміщена між торцями двох волокон з діаметром кварцової серцевини 125 мкм. Дослідження показали, що виготовлені ЧЕ є механічно достатньо міцними: сила, при якій з'єднання розривається є близьким до значення границі міцності на розрив кварцового ОВ. Досить хорошими є й інші експлуатаційні параметри ВОТ з кремнієвим ЧЕ:

- діапазон вимірювання температур від -60 °С до $+250$ °С;
- абсолютна похибка вимірювань: $\pm 0,2$ °С;
- швидкодія: менше 0,02 с;
- довжина волоконно-оптичного тракту: до 50 м.



Рис. 1.24. Фотографія ВОДТ на основі кремнієвої мікропластинки [16]

У розроблених до наших досліджень ВОДТ переважно використовують термочутливі елементи на основі пластинок або плівок монокристалів GaAs та Ge [17-20]. Але для них характерними є певні недоліки [21]: чутливість

матеріалу чутливого елемента до впливу радіації, нелінійність температурної залежності пропускання ЧЕ на робочій довжині хвилі та відсутня можливість вимірювання температури у широкому діапазоні з використанням однієї робочої довжини хвилі.

Аморфні халькогенідні стекла багатьох систем позбавлені цих недоліків. Крім того, вони володіють і багатьма іншими позитивними рисами для різних практичних застосувань [22]: добре розробленою технологією синтезу, хорошими оптичними властивостями в інфрачервоному діапазоні спектру, чітко вираженими температурними залежностями оптичних властивостей, широкими областями склоутворення, нечутливістю до дії інтенсивних зовнішніх електромагнітних полів, високою радіаційною стійкістю та інше. Халькогенідні стекла та їх аморфні плівки і на сьогодні залишаються під пильною увагою дослідників, розкриваючи щоразу нові особливості у своїх фізико-хімічних властивостях.

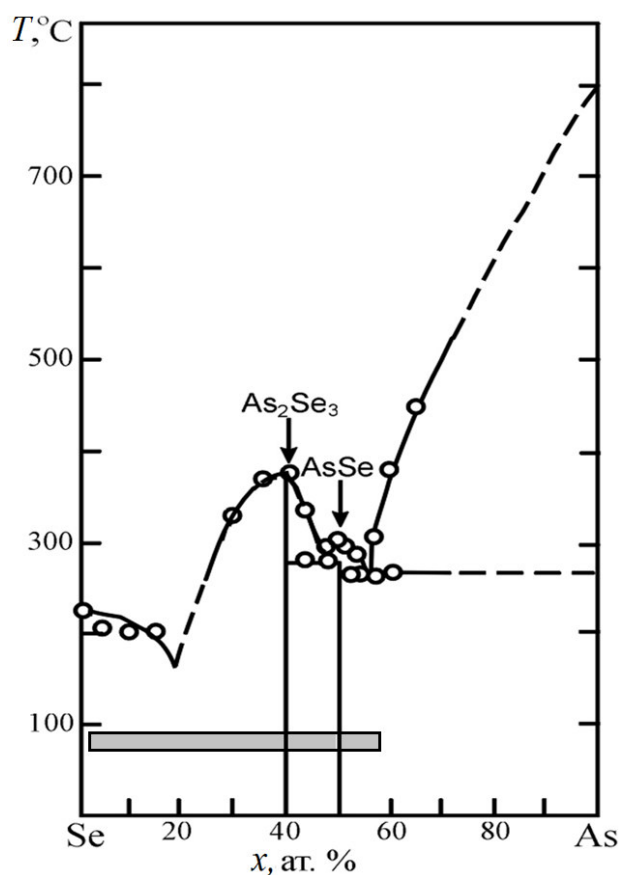


Рис. 1.25. Діаграма стану та область склоутворення (виділена смугою) системи As_xSe_{100-x} [22]

Яскравим прикладом перспективних для різних оптичних застосувань халькогенідних стекол є матеріали системи As-Se. Область склоутворення у цій системі простирається від чистого селену до складів, які містять біля 60 ат.% миш'яку (рис. 1.25) [22]. Більшість стекол із наведеної області мають хороший набір фізико-хімічних та технічних експлуатаційних властивостей для застосування в якості чутливих елементів ВОДТ. Крім того, відповідно з діаграмою стану (рис. 1.25) у халькогенідній системі As-Se в області склоутворення існують дві індивідуальні хімічні сполуки As_2Se_3 і As_2Se_2 у вигляді кристалів, які плавляться конгруентно при температурах $360^\circ C$ і $312^\circ C$, відповідно. Дані кристали теж мають цілий ряд позитивних рис для оптоелектроніки [23].

Висновки до розділу 1

Дослідження конструктивних особливостей основних типів сучасних ВОДТ і ВОТ, критичний аналіз їхніх позитивних й негативних рис та експлуатаційних параметрів показує, що для широкого використання найбільш підходять волоконно-оптичні прилади амплітудного типу з ЧЕ на основі напівпровідникових матеріалів. Для практичного застосування ВОТ такого типу необхідно суттєво покращити їхні технічні та метрологічні характеристики. Дана задача може бути розв'язана шляхом всесторонньої оптимізації параметрів як вихідних термочутливих матеріалів, так і конструкції та основних характеристик всіх елементів ВОТ, що й визначило тему цієї роботи та її актуальність.

РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Технологія виготовлення кристалічних чутливих елементів

У даній роботі було використано кристали вихідного матеріалу, виготовлені київською компанією «Монокристал» з яких у подальшому виготовлялися чутливі елементи. Для досліджень використано, леговані Zn, кристали GaP з концентрацією легуючої домішки $2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ та кристали GaAs з концентрацією легуючої домішки $6,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Найбільш розповсюдженим способом одержання ЧЕ для ВОДТ із напівпровідникових кристалів є обробка вихідного матеріалу з метою надання йому необхідної геометричної форми та товщини [24]. Даний процес, як правило, включає кілька послідовних етапів механічної обробки та електрополірування кристалічних взірців у спеціальних розчинах. У наших дослідженнях використовувались ЧЕ, виготовлення яких проходило через такі технологічні процеси:

- нарізання пластинок необхідної товщини за допомогою алмазного диску або рухомої струни;
- шліфування поверхонь на "грубих" абразивних порошках з розміром зерна від 5 мкм до 10 мкм;
- шліфування поверхонь абразивним порошком з мінімальним розміром зерна;
- полірування на грубих алмазних пастах M5, M8, M10;
- полірування на тонких алмазних пастах M1,0, M0,5;
- електрополірування в розчині.

При першій технологічній операції із монокристалу вирізалася плоскопаралельна пластинка товщиною від 1,5 мм до 2 мм. У послідуєчому ця

пластина розрізалася на паралелепіпеди зі сторонами в кілька міліметрів, які й слугували заготовками майбутніх ЧЕ.

Для проведення операцій шліфування і полірування отримані заготовки приклеювалися до тримача шліфувального станка за допомогою салолу. Закріплені взірці шліфувалися абразивними порошками відповідної зернистості для отримання необхідної товщини ЧЕ та для підготовки їх поверхонь до полірування.

Полірування виконувалося на обтягнутому батистом скляному крузі за допомогою алмазних паст. Приклад готового ЧЕ із кристалу GaP наведено на рис.2.1.

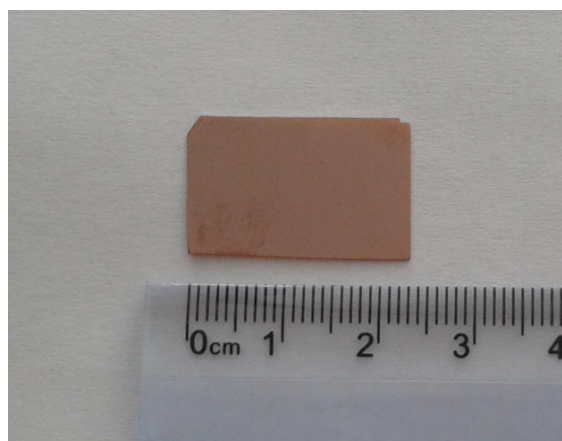


Рис. 2.1. Фотографія кристалу GaP, який використовувався при оптичних дослідженнях

Фінішна операція електрополірування проводилася у ванні із розчином ортофосфорної кислоти (концентрацією не більше 1,7 моль/л) при кімнатній температурі, струм 50 мА, напруга 25 В, тривалість 1-3 хвилини на один цикл полірування. Для даних робіт також може бути використана спеціалізована установка MODEL 110 Twin-Jet Electropolisher [26].

Для контролю впливу технологічних операцій виготовлення ЧЕ на їх оптичні властивості після кожного етапу проводилися дослідження спектрів пропускання зразків ЧЕ. Виявилося (рис.2.2), що стан поверхні заготовок кристалічних ЧЕ GaP суттєво впливає на їхні оптичні спектри. Зрозуміло, що такий вплив буде значним чином відображатися на експлуатаційних

параметрах ВОТ із ЧЕ GaP, зокрема на величині вихідного інформаційного сигналу сенсора та на його чутливості.

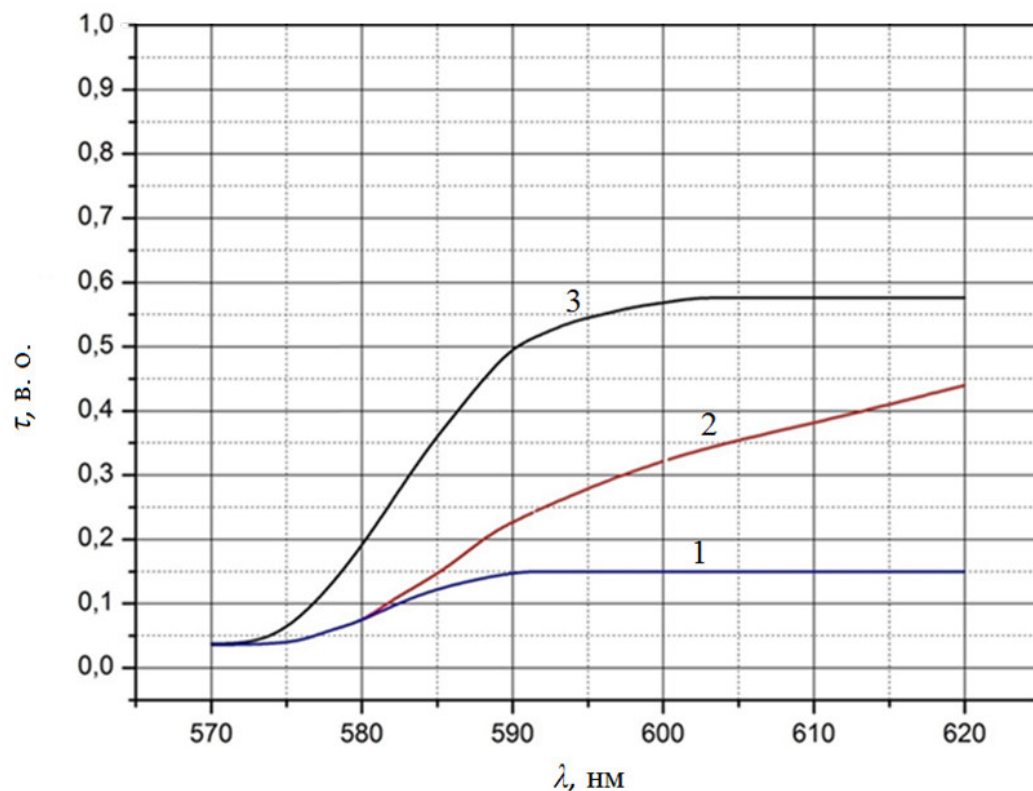


Рис. 2.2. Залежність пропускання ЧЕ із кристалів GaP при кімнатній температурі від якості обробки їхньої поверхні: 1 – поліровка алмазною пастою M5,0; 2 – поліровка алмазною пастою M1,0; 3 – поліровка алмазною пастою M0,5 та електрополіровка

Отримані результати свідчать про дуже великий вплив стану поверхні ЧЕ після базових операцій їхньої технологічної обробки. Зокрема, спостерігається сильна неконтрольована дія операцій механічної обробки на спектри пропускання ЧЕ. І, як видно із рис.2.2, електрополірування поверхонь кристалічних ЧЕ має бути обов'язковою технологічною операцією їхнього виготовлення для застосувань у якості високостабільних оптичних сенсорів ВОДТ. Тому в наших дослідженнях ми використовували лише ЧЕ із кристалів GaP товщиною біля 300 мкм з високою якістю обробки поверхонь обох робочих граней методом електрополірування.

2.2 Технологічні дослідження методів одержання чутливих елементів із стекел As-Se

З точки зору використання стекел як матеріалів ЧЕ ВОДТ дуже важливим параметром є температура їх склування (або розм'якшення) T_g . Вона визначає температурні режими технологічного процесу виготовлення чутливого елемента та задає верхню границю робочого температурного діапазону ВОТ. Тому коротко розглянемо основні аспекти досліджень цієї величини для стекел As-Se. Зокрема, у роботах [27, 28] аналізується комплексний вплив технологічних, кінетичних, теплових і структурних чинників на величину температури T_g в даних стеклах. Показано [29], що в рамках стохастичної агломераційної теорії теоретична функціональна залежність T_g від вмісту миш'яку x наближено задається диференціальним рівнянням:

$$dT_g/dx = T_{gSe}/\ln(3/2), \quad (2.1)$$

де T_{gSe} – температура розм'якшення чистого Se.

Однак, при практичному використанні наведеної теоретичної залежності слід мати на увазі, що в околі сполуки As_2Se_5 мають місце відчутні відхилення експериментальних даних від розрахованої залежності. Як показано в дослідженні [30], такі відхилення обумовлені складними немонотонними змінами атомної структури стекел при зміні їх хімічного складу. Тому при розробці та оптимізації технологічних процесів виготовлення ЧЕ для ВОДТ ми користувалися експериментальною концентраційною залежністю величини T_g стекел As-Se, взятою із публікації [31] і наведеної на рис. 2.3.

Враховуючи наведені вище дані, нами стекла As_xSe_{100-x} для досліджень синтезувалися з елементарних компонентів високої хімічної чистоти (ОСЧ „В-4”) в попередньо очищених хімічними методами кварцових ампулах. Хімічний склад скла задавався відповідним співвідношенням миш'яку і селену в підготовленій шихті. Заповнені шихтою ампули вакуумувалися та поміщалися в піч для синтезу стекел. При цьому швидкість нагріву ампул лежала в

діапазоні від 250 К/год до 300 К/год. Нагріту до 1000 – 1100 К шихту витримували протягом 10 - 12 годин для повного завершення хімічної взаємодії вихідних компонентів і гомогенізації розплаву. На завершальному етапі синтезу розплав в ампулах охолоджувався до кімнатної температури у режимі вимкненої печі, що відповідає середній швидкості охолодження біля 0,1 К/с. Для окремих хімічних складів стекол, збагачених миш'яком, ампули з розплавом охолоджували в холодній воді. Для такого режиму середня швидкість охолодження була приблизно рівна 0,4 К/с.

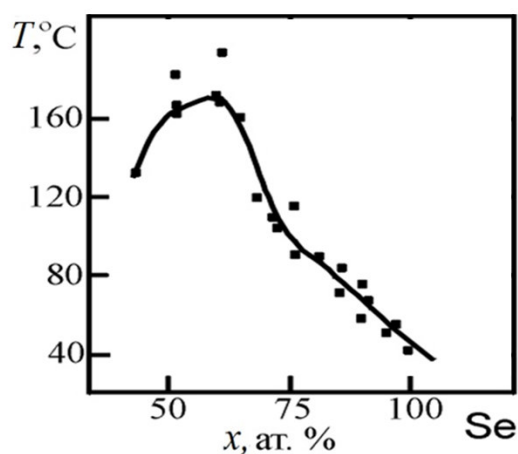


Рис. 2.3. Концентраційна залежність температури розм'якшення T_g стекол As_xSe_{100-x} [31]

Критичний аналіз даних першого розділу дисертації показує, що ЧЕ ВОДТ повинні задовольняти кільком основним вимогам. По-перше, їх геометрична форма повинна бути зручною для монтування її в конструктив термометра. По-друге, елемент не має бути занадто товстим, щоб забезпечувати достатньо високе пропускання оптичного випромінювання. При цьому інтенсивність випромінювання на виході елемента має забезпечувати надійну його реєстрацію. По-третє, товщина елемента не має бути і занадто малою, оскільки зміни його температури мають забезпечувати такі величини змін параметрів оптичного випромінювання, які легко реєструються і забезпечують необхідну чутливість термометра. По-четверте, робочі поверхні елемента мають бути дзеркальними для уникнення ефектів розсіювання випромінювання на них.

Першим апробованим нами методом одержання ЧЕ із стекел була їх механічна обробка за технологією, описаною вище для кристалічних зразків. Численні дослідження показали, що процеси шліфування та полірування міліметрових зразків халькогенідних стекел As-Se вимагають граничної обережності та акуратності через високу пластичність цих матеріалів. Найменше відхилення від оптимальних умов шліфування приводило до появи сколів в елементах, а також до виникнення тріщинок та подряпин на поверхні взірця. Приклад такого готового ЧЕ із скла AsSe наведено на рис. 2.4.

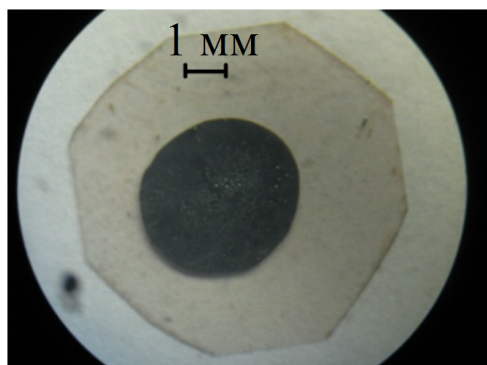


Рис. 2.4. ЧЕ із скла AsSe, що використовувався у дослідженнях

Проведені нами технологічні дослідження також показали, що механічний метод одержання ЧЕ із стекел As-Se має й багато інших недоліків: складний та довготривалий процес вирізування взірців і їх шліфування та полірування; потребує хороших умінь та навичок; досить високий ступінь ризику пошкодити взірець у процесі його виготовлення; обмежені можливості отримання товщини взірця меншою 1 мм, що пов'язано з особливостями будови стекел As-Se. Відмітимо, що з кристалічних напівпровідникових матеріалів механічним методом нами легко отримувалися у кілька разів менші товщини ЧЕ.

Крім того, виконані нами оптичні дослідження показали, що для механічно полірованих елементів товщиною біля 1 мм із стекел As_xSe_{1-x} більшості складів характерне високе поглинання та розсіювання. У результаті чутливість та температурний коефіцієнт ВОДТ з такими елементами були досить малими.

Для подолання недоліків механічного методу виготовлення ЧЕ із масивних стекол As_xSe_{1-x} ми досліджували також можливість використання для цього тонко-плівкових технологій вакуумної конденсації. Особливістю таких ЧЕ є й можливість модифікації їхньої структури для покращення фізичних параметрів [32].

Для отримання однозначних, відтворюваних і достовірних оптичних властивостей аморфних плівок важливим є строгий контроль основних параметрів їх осадження із парового потоку. При проведенні всіх технологічних процесів враховувалися такі найважливіші характеристики: хімічний склад вихідних речовин; вид випарника та його матеріал; температура випарника; температура підкладки; відстані від випарника до підкладки; швидкість конденсації; умови зберігання отриманих взірців.

Для методів вакуумного осадження плівок важливим є вибір належної конструкції термічних випарників. Як показали технологічні експерименти достатньо якісні технологічні умови одержання аморфних плівок As-Se забезпечувалися закритими пряморозжарюваними випарниками – ефузійними комірками. Вони виготовлялися у формі пустотілого паралелепіпеда з багатьма дрібними отворами для виходу пари. Розроблена конструкція випарника дозволяла уникати викиду з його об'єму й впровадження в матеріал плівки дрібних частинок речовини. У відкритих же випарниках такі частинки, не встигнувши випаритись, могли підхоплюватися струменями парового чи теплового потоків та переносилися на підкладку. Матеріалом для виготовлення всіх типів випарників служили листи танталової фольги завтовшки 0,1 мм.

У системі As-Se при отриманні аморфних плівок більшості хімічних складів спостерігається дисоціативний характер їх випаровування [33]. Це зумовлює значну відмінність у парціальних тисках компонентів пари, що веде до поганої відтворюваності хімічного складу отримуваних плівок та порушення їх хімічної однорідності. Тому для випаровування таких речовин нами використовувався також метод дискретного термічного випаровування. Відтворюваність та однорідність аморфних плівок за хімічним складом у цьому

методі забезпечується неперервною подачею у випарник дрібного порошку речовини. Це не ліквідує дисоціативного характеру випаровування окремих частинок порошку, але приводить до усереднення хімічної однорідності парового потоку внаслідок послідовних і квазінеперервних у часі актів випаровування кожної з них.

Для технологічних процесів ми застосовували серійну технологічну установку ВУП-5 із штатною системою, яка складалася з випарника та пристрою для неперервної подачі порошку речовини у випарник у вигляді вібродозатора. Такі конструктивні особливості системи дозволяли легко дотримуватися умов “дискретності” випаровування порошку всіх матеріалів системи As-Se. Порошок із вібробункера попадав у випарник при допомозі жолоба або тонкої кварцової трубки, яка могла вводиться безпосередньо у ефузійну комірку через спеціальний отвір. Для екранування жолоба або кварцової трубки від випромінювання випарника застосовувався спеціальний екран.

Температура випаровування стекел As-Se вимірювалася Pt/Pt-Ro термопарою, яка вмонтовувалася у спеціальну складку на корпусі випарника. При дискретному випаровуванні температури випаровування складали 800 - 1100 К у залежності від хімічного складу вихідного скла. Живлення випарників здійснювалося від приладу автоматичного регулювання й стабілізації температури РИФ-2. Такий контроль температури випаровування забезпечував точність ± 5 К. Швидкості конденсації аморфних плівок були в діапазоні від 1 нм/с до 10 нм/с. Контроль товщини плівок здійснювався прямим фотометричним методом. В окремих випадках використовувався контроль товщини шляхом задавання маси випаровуваної речовини. Для цього при заданій фіксованій геометрії осадження проводилося випаровування точно зваженої кількості матеріалу з отриманням пробної плівки товщиною біля 1 мкм. Після вимірювання товщини даної плівки на інтерференційному мікроскопі МІІ-4, визначалася товщина випареного матеріалу, необхідна для

отримання в цій же геометрії осадження зразків з різними товщинами для оптичних досліджень.

Як підкладки для осадження плівок у більшості випадків використовували пластинки кварцового скла. Підкладки спеціально не підігрівалися і знаходилися під час конденсації при кімнатній температурі.

Перед конденсацією аморфних плівок вихідні стекла As-Se розтиралися в агатових ступках у мілкий порошок. Для дискретного термічного випаровування проводилося ретельне калібрування подрібненого порошку вихідного матеріалу, який випаровувався, за розмірами частинок. Така операція проводилася за допомогою набору еталонних сіточок. У залежності від індивідуальних особливостей матеріалу As-Se, оптимальний розмір частинок був різним і зазвичай лежав у діапазоні від 50 до 100 мкм. При цьому оптимальними вважалися такі розміри частинок, при яких найкраще поєднувалися умови дискретності випаровування окремих частинок та їх безперебійної подачі із вібробункера.

Виконані технологічні дослідження показали суттєві недоліки даного методу отримання плівкових чутливих елементів: складності вирізання та надійного кріплення у вакуумній камері підкладок маленьких розмірів; високу імовірність її механічного пошкодження; можливість відшарування плівки від підкладки; труднощі встановлення елемента в оптичному тракті ВОДТ; наявність великих конденсаційних механічних напружень в системі підкладка-плівка; виникнення додаткових механічних напружень у системі при зміні її температури за рахунок відмінностей коефіцієнтів термічного розширення плівки і підкладки. Тому отримати мікроскопічні ЧЕ задовільної оптичної якості на основі плівок As-Se нам представляло значні труднощі.

Відмітимо також, що хороші оптичні та механічні властивості системи плівка-підкладка реалізуються лише при товщинах плівок As-Se до 2 - 3 мкм. При подальшому збільшенні товщини вони часто втрачали адгезійний зв'язок з підкладкою, втрачали механічну стійкість, у них з'являлося багато мікротріщин, відбувалося часткове їх відлущення від підкладки.

Оптичні дослідження плівкових ЧЕ товщиною біля 1,5 мкм показали (рис. 2.5), що діапазон змін оптичного сигналу на краю їх поглинання є досить малим для надійного вимірювання простими оптоелектричними перетворювачами. Це було обумовлено як недостатньою товщиною чутливої плівки, так і впливом на проходження оптичного випромінювання всієї системи плівка-підкладка (відбивання на кількох межах розділу, вплив інтерференційних ефектів на плівці, збільшення розсіювання тощо). Крім того, часто при таких вимірюваннях спостерігалися неконтрольовані зміни величини поглинання плівок, які стимулювалися дією оптичного випромінювання спектрофотометра. Такі ефекти обумовлені значною фоточутливістю плівок халькогенів, у тому числі і системи As-Se, прояви якої вивчалися різними дослідниками [34, 35]. Проблематичним було і нанесення на поверхню таких плівкових ЧЕ відбиваючих дзеркальних покриттів із-за стимульованої дифузії металів у матрицю плівок As-Se [36].

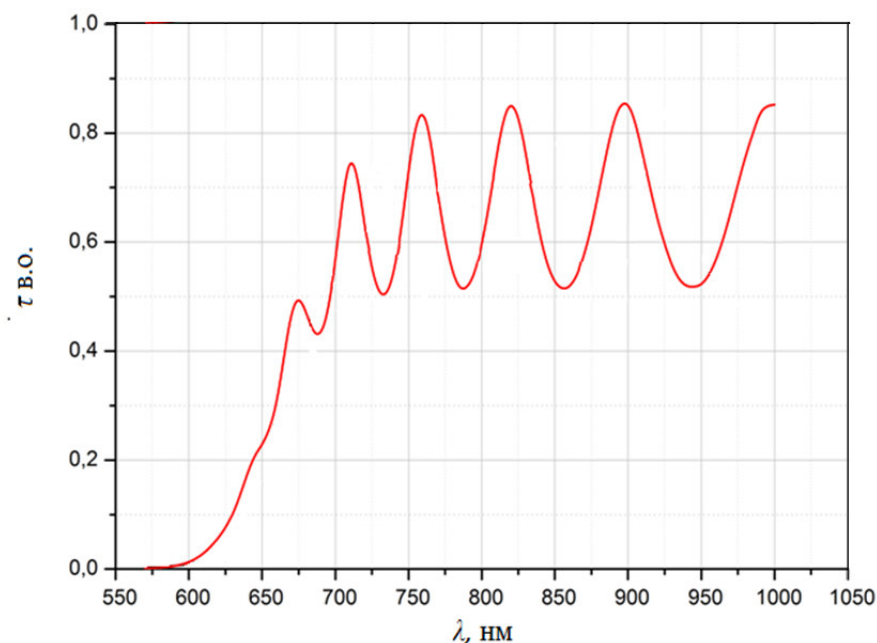


Рис. 2.5. Спектр пропускання плівки As_2Se_3 товщиною 1,5 мкм

Таким чином, розглянуті вище два методи одержання ЧЕ для ВОДТ на основі стекел системи As-Se мають ряд суттєвих недоліків. Крім вже згаданих, необхідно також відмітити, що у процесі проведених робіт по оптичному з'єднанню різних ЧЕ у формі маленьких паралелепіпедів з ОВ потрібні

спеціальні мініатюрні конструктиви, які досить складно виготовити та експлуатувати. Одночасно було виявлено, що для формування оптимального оптичного сигналу у ВОДТ товщина ЧЕ із As-Se повинна знаходитися у діапазоні 0,2 - 0,5 мм. Одержати такі взірці задовільної оптичної якості вище описаними традиційними методами виявилось практично неможливо: відполіровані пластинки були у кілька разів товстішими, а плівки – майже на порядок тоншими. Це спонукало нас до пошуку інших методів виготовлення ЧЕ для ВОДТ із халькогенідних стекел.

2.3 Формування чутливих елементів методом роздавлювання

Як відомо, у околі температури розм'якшення стекел спостерігається різке зменшення їхньої в'язкості (рис.2.6). Ми використали цю властивість стекел As-Se для формування із них готових ЧЕ, шляхом пластичної зміни форми та розмірів невеликої крупинки матеріалу при досягненні ним температури, близької до T_g .

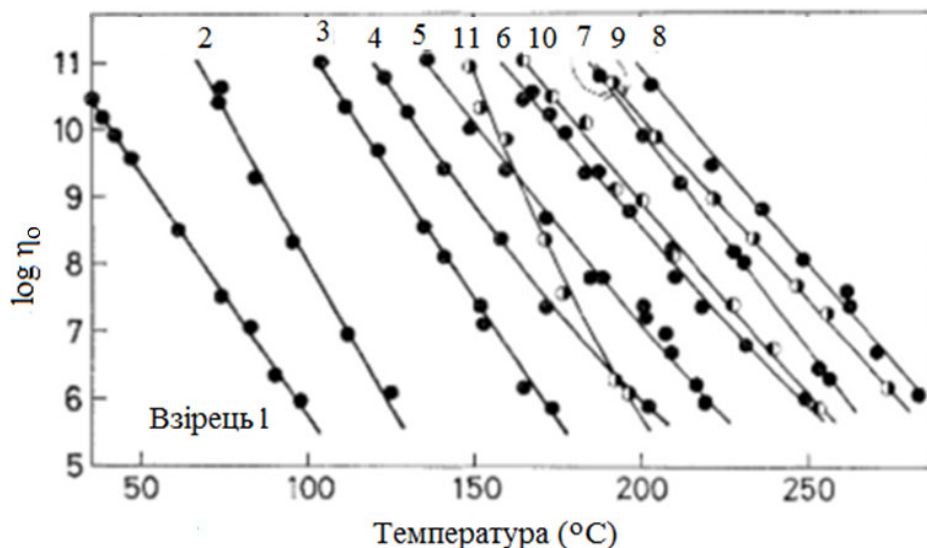


Рис. 2.6. Залежність в'язкості η_0 від температури для стекел системи As-Se. [25]

На рис. 2.6 представлено залежність в'язкості від температури для стекел системи As-Se, де номер зразка відповідає складу, що приведено у таблиці 2.1.

У своїй роботі ми використовували крупинки стекол системи As-Se каліброваного розміру. Для цього вихідне скло механічно подрібнювалося. Отриманий порошок сортувався за допомогою калібровочних сит із заданим діаметром отворів. У результаті сортування відбиралися ті крупинки скла, які за своїм об'ємом забезпечували формування чутливого елемента із наперед заданими формою та розмірами.

Таблиця 2.1

Хімічний склад взірців зі стекол системи $As_xSe_{(1-x)}$ [25]

x	№ взірця	x	№ взірця
0	1	0,40	7
0,10	2	0,45	8
0,20	3	0,50	9
0,25	4	0,55	10
0,30	5	0,60	11
0,35	6		

Виготовлення ЧЕ проводилося у спеціально сконструйованій термічній камері, конструкція якої наведена на рис. 2.7. Розроблена камера складається з преса 1 для 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 2, двох термоізоляційних керамічних дисків 3, зовнішнього термоізоляційного кожуха 5 та масивної основи 4 для збільшення теплової інерційності системи. Тягарем 6 створювалося необхідне механічне навантаження на крупинку. Система контролю температури термокамери була побудована на базі приладу РИФ – 2. Вона складається з силового 7 та програмного 8 блоків, термопари 10 і термостата 9. Момент часу досягнення в термокамері температури розм'якшення скла та початку деформації крупинки фіксувався за початком змін показів висотоміру 11.

Процес виготовлення чутливого елемента відбувається наступним чином (рис.2.8). Між двома робочими деталями 4 пресу поміщається сталеве кільце 3 із невеликим прорізом, діаметр та товщина якого задає геометричні розміри взірця, який формується. Після в середині цього кільця розміщується на скляній або слюдяній пластині-підкладці 2 калібрована крупинка вихідного скла 1. Зверху поміщається аналогічна пластинка.

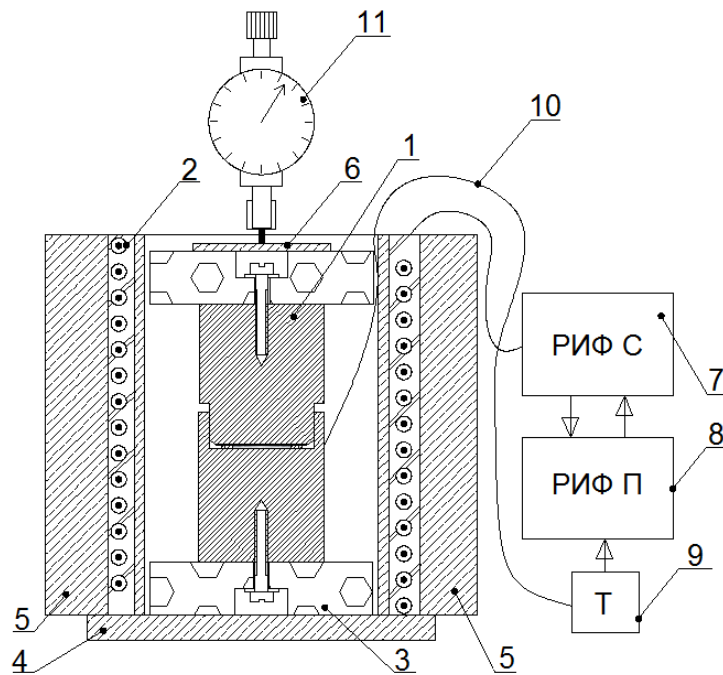


Рис. 2.7. Схема конструкції термічного пресу для виготовлення ЧЕ ВОДТ із крупинок стекл As-Se

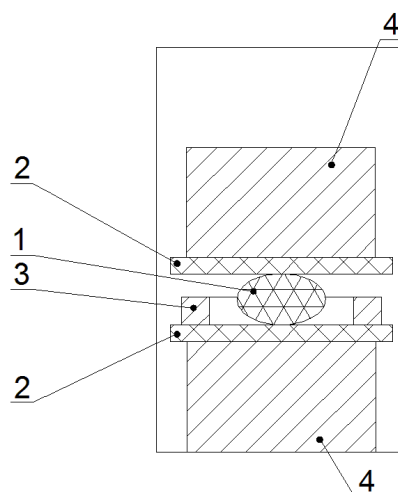


Рис. 2.8. Схема робочої зони пресу для виготовлення чутливих елементів ВОДТ

Вся конструкція пресу поміщалася в термокамеру. Потім до верхньої наковальні прикладали регульоване механічне навантаження (вантаж заданої маси) з метою деформації крупинки при її нагріванні. Величина навантаження вибиралася в залежності від товщини та діаметру кільця, а також від хімічного складу скла, із якого виготовлявся взірець. Після монтажу всіх елементів термокамера нагрівалася зі швидкістю $(0,5 \pm 0,1)$ К/хв до температури розм'якшення даного скла As-Se. При цьому температура розчавлення та величина навантаження залежали від хімічного складу вихідного скла As-Se і розміру його крупинок. Це пов'язано з відмінностями температури розм'якшення та коефіцієнта в'язкості для різних складів даних стекол (див. рис. 2.3 та рис.2.6). У таблиці 2.2 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 пластинки, t_o – час, за який відбувалося охолодження взірця від температури формування пластинки до кімнатної температури.

Таблиця 2.2

Робочі температури на яких відбувався процес формування ЧЕ

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

Нагріта калібрована крупинка в розм'якшеному стані витримувалася протягом 10 – 15 хв. Під дією прикладеного до неї навантаження вона пластично деформувалася у пластинку із формою і розмірами, які задавалися параметрами сталюого кільця 3. Надлишковий матеріал при формуванні термочутливого елемента витікав через проріз 8 у кільці (рис. 2.9а).

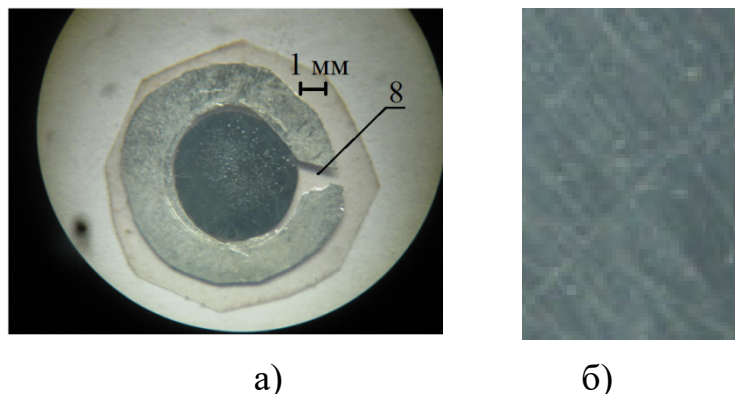


Рис. 2.9. Фотознімки сформованого ЧЕ та його поверхні

На рис. 2.9 також показано фотознімки сформованого ЧЕ на різних технологічних етапах його виготовлення: а – розміщеного на нижній наковальні у формувальному кільці; б – поверхня ЧЕ (збільшено в 50 разів). Дефекти на поверхні взірця, виготовленого описаним способом, які видно на рис.2.9 б, пов'язані з якістю поверхні підкладок між якими поміщається крупинка матеріалу у процесі виготовлення взірця. Тому важливим є використання в технологічному процесі підкладок з високою якістю поверхні, зокрема відсутність на них подряпин, сколів та інших мікродефектів.

У процесі виготовлення взірців методом роздавлення часто виникала проблема з відділенням готового взірця від підкладки. Внаслідок прилипання взірця до підкладок потрібно було прикладати певні механічні зусилля при їх розділенні. Але із-за малої товщини взірця та крихкості стекел As-Se взірці руйнувалися при відриві від підкладки. Рішенням даної проблеми стало нанесення на поверхні підкладок тонкого шару покриття з малим ступенем адгезії до стекел As-Se. Такий технологічний прийом дозволяв нам отримувати методом роздавлення, термочутливі взірці хорошої оптичної якості товщиною $d \geq 0,1$ мм та діаметром 2 – 5 мм.

Однією з особливостей використання ЧЕ ВОДТ є необхідність встановлення його в оптичний тракт (розрив світловоду) з малою площею S поперечного перерізу від $0,1 \text{ мм}^2$ до 1 мм^2 . Для такого застосування взірці ЧЕ мають мати такі ж малі розміри. Розроблена нами технологія одержання ЧЕ методом роздавлення вирішує й дану проблему. Для цього між наковальнями пресу в середину калібровочної шайби поміщається сталева сітка з формою та розмірами комірок, які відповідають необхідній формі чутливого елемента. При цьому в одному технологічному циклі можна одержувати декілька якісних взірців ЧЕ для ВОДТ.

Таким чином, наші технологічні дослідження показали, що оптимальною технологією виготовлення ЧЕ із стекел As-Se для ВОДТ є метод роздавлення. Тому подальші наші дослідження були сконцентровані переважно на різних конструкціях ВОДТ саме з такими ЧЕ.

2.4 Оптимізація методів експериментальних досліджень параметрів та характеристик чутливих елементів та волоконно-оптичних термометрів

Для проведення спектральних досліджень нами було створено оптичний лабораторний стенд на основі спектрофотометра СФ-46. Блок-схема даного стенду наведена на рис. 2.10.

При температурних дослідженнях взірці 7 поміщалися у спеціальний термобокс 2. Оптичне випромінювання від спектрометра 1 направлялось на взірець у термобоксі за допомогою ОВ 10. 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 програмного 4 та силового 3 блоків приладу РИФ-101. Для вимірювання температури взірців у середині термоблоку використовувалися термостат 5 та (хромель-алюмелева) термопара 6. 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.

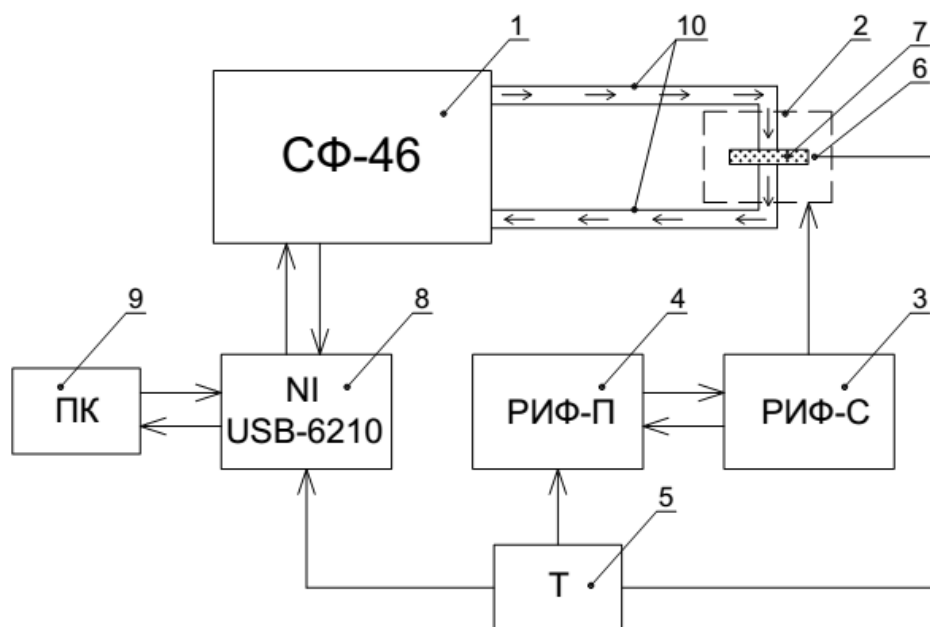


Рис. 2.10. Блок-схема експериментального стану для спектральних оптичних досліджень

При налагодженні стану реєстрація температурних змін оптичного пропускання взірців проводилася за допомогою двохкоординатного потенціометра ПДП-021, який працював або в режимі двох змінних (сигнали від термопари та спектрофотометра), або в режимі часової розгортки сигналу від спектрофотометра. У процесі ж фінішних досліджень взірців стекел та чутливих елементів реєстрація сигналу від спектрофотометра проводилася спеціалізованим аналогово-цифровим перетворювачем National Instruments NI USB-6210. Цифровий сигнал для автоматизованої обробки та зберігання подавався на персональний комп'ютер 9.

Для дослідження спектрів пропускання виготовлених взірців, що в подальшому використовувалися у якості термочутливих елементів ВОДТ, при температурах нижче кімнатної в описану вище установку на основі

спектрофотометра СФ-46 (рис. 2.10) встановлювався спеціальний охолоджувальний бокс на основі термоохолодильника Пельтьє. Даний охолоджувальний бокс дозволяє контрольовано знижувати температуру нижче кімнатної та утримувати її на певному фіксованому рівні у заданому об'ємі. Схема конструкції даного термо-боксу наведена на рис. 2.11.

Принцип роботи даного термо-боксу базується на використанні елемента Пельтьє 6, що затиснутий між охолоджуваною «чашею» 4 та радіатором для відводу тепла 7. Для покращення теплопередачі механічний контакт елементів виконано через берилієву термопасту, а для покращення термоізоляції охолоджувана чаша 4 поміщена у пінопластовий кожух 3. У середині чаші знаходиться підставка 2, у якій зафіксовано оптичні хвилеводи 5 для передачі оптичного випромінювання. Між хвилеводами 5 встановлюють досліджувані зрізки 1 для проведення оптичних досліджень спектрів пропускання при низьких температурах. Для зменшення імовірності появи конденсату на внутрішніх поверхнях боксу у середину чаші 4 поміщено силікагель 8. Застосування даного термо-боксу дозволяє охолодити досліджувані зрізки до температури -29°C .

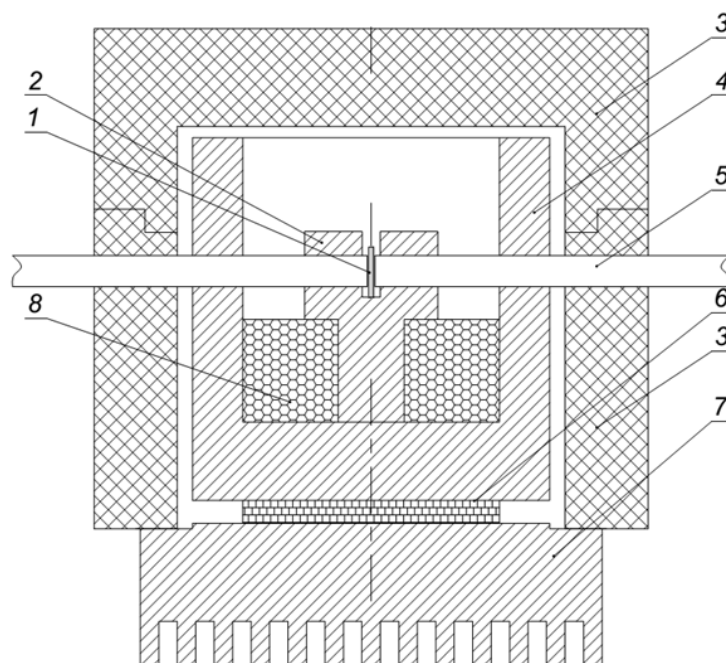


Рис. 2.11. Схема охолоджувального термо-боксу для оптичних досліджень термочутливих елементів при низьких температурах

Даний термо-бокс було зібрано на базі термоелектричного лабораторного мікрохолодильника ТЛМ та блока живлення ВСП-33.

Для дослідження експлуатаційних характеристик ВОДТ та ВОТ нами було також розроблено та створено спеціалізований лабораторний стенд. Його конструкція дозволяла швидко змінювати різні ВОДТ або встановлювати в нього цілий ВОТ. Фізичною основою роботи стенду 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 стенду, 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).

Робота спеціалізованого стенду була побудована на принципах експлуатації реальних ВОТ. Він забезпечує високоточну реєстрацію змін величини оптичного пропускання чутливого елемента на фіксованій довжині хвилі при варіації його температури. У цьому відношенні високі вимоги ставляться до спеціалізованого приладу, який проводить реєстрацію і первинну обробку аналогового інформаційного сигналу від ВОДТ. Для таких застосувань найкращі параметри мають спектральні комплекси для дослідження ОВ. Але їхні цінові показники та складність експлуатації не дозволяють широко впроваджувати дані прилади для практичного використання в різних галузях діяльності людини. Із цих же причин ми зробили висновок про недоцільність використання таких приладів у наших дослідженнях і в конструкціях ВОТ.

Альтернативою спектральним приладам у реальних конструкціях ВОТ виступають світлодіоди і оптичні лазери як джерела вихідного випромінювання та фотодіоди як реєструючі прилади. Застосування сучасних прогресивних схем обробки оптичного сигналу у таких схемах наближає їхні експлуатаційні характеристики до спектральних приладів.

Ще однією проблемою систем реєстрації сигналу ВОТ є конструкція синхронізованих модулятора та демодулятора. Наші дослідження показали, що при виборі в якості елементної бази дискретних електронних компонентів не вдається досягти необхідної завадостійкості та дрейфу нуля інформаційного сигналу. Як виявилось, причина цього полягає в розкиді параметрів польових транзисторів, на яких реалізуються електронні ключі модулятора і демодулятора.

Нами було випробувано і альтернативний спосіб заміни модулятора – використання потужного ПЧ напівпровідникового лазера із вбудованою схемою імпульсної модуляції вихідного випромінювання. Крім всього іншого це дозволяло значно підвищити співвідношення сигнал/шум на виході оптичної схеми. Але випробування показали, що лазерне випромінювання, яке проходить через ВОДТ, веде до неконтрольованого нагрівання чутливого елемента. Це вносить суттєві похибки в результати вимірювань температури ВОТ.

Проведені нами дослідження дозволили зробити висновок: оптимальним у схемі реєстрації сигналу ВОТ є застосування в якості джерела випромінювання світлодіодів та інтегральних мікросхем в якості електронних компонентів модулятора та демодулятора сигналу. Такий підхід і був нами реалізований у розробленому вимірювальному стенді із оптимізованим оптоелектронним регістратором (ОР) (рис.2.12). Даний стенд став також основою для розробки конструкцій оптичного тракту та електроніки створених нами ВОТ.

Основою нашого ОР став блок аналогової обробки інформаційних оптичних сигналів з їх амплітудною модуляцією. Умовно вона може бути поділена на дві частини: вузол випромінювача, який забезпечує модульований стабілізований потік світла та вузол фотоприймача із підсилювача і демодулятора. У розрив цих двох частин вводиться ВОДТ (рис.2.12).

Як видно із рис.2.12, крім ОР у склад вимірювального стенду також входять: джерело 2 та приймач 3 випромінювання, які легко можна замінювати при переналаштуванні установки; ОБ 4 для передачі оптичного сигналу;

термобокс 6, у якому забезпечується регулювання температури з низьким рівнем інерційності і в який поміщається досліджуваний ЧЕ 5; система регулювання температури, зібрана на базі комплекту РИФ-101 із елементами 7, 8, 9 та виносною термопарою 10 (ця система є тотожною до стенду рис.2.10); АЦП 11 та персональний комп'ютер 12.

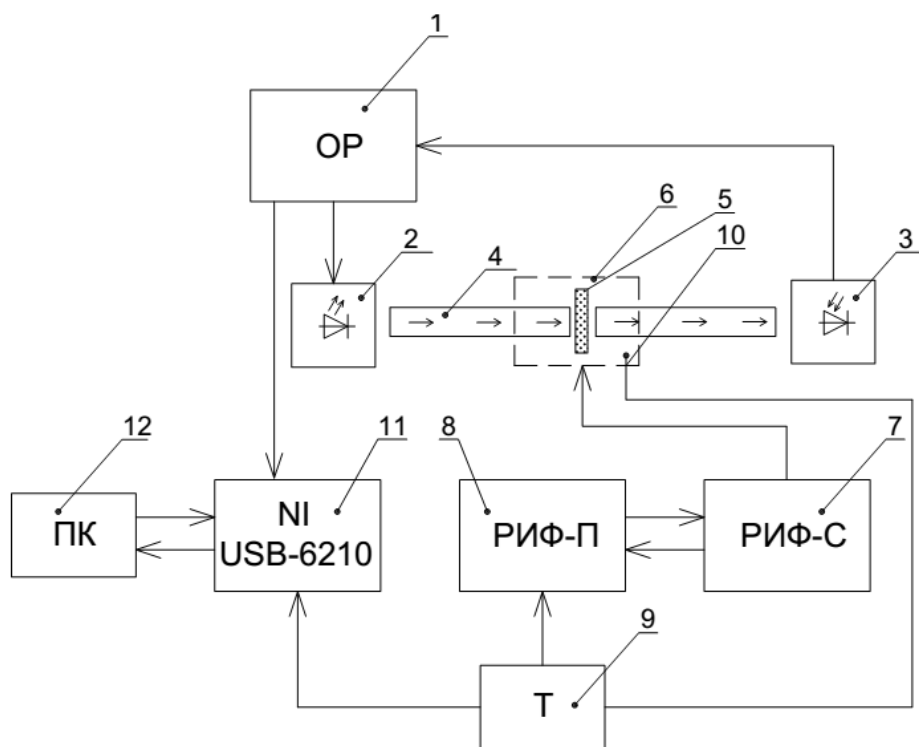


Рис. 2.12. Блок-схема експериментальної установки для дослідження експлуатаційних характеристик ВОДТ

Створений стенд дозволяв якісно та швидко проводити дослідження експлуатаційних характеристик різного типу ЧЕ та ВОДТ. Він забезпечує проведення вимірювань передавальної характеристики ЧЕ проєктованих ВОДТ; ступеня спектрального узгодження оптичних елементів проєктованих ВОДТ; порогову чутливість різних оптичних схем ВОДТ, інерційність ЧЕ ВОДТ; зміни передавальної характеристики ЧЕ та експлуатаційних параметрів ВОДТ при багаторазових циклах підвищення й зниження температури; процеси деградації ЧЕ та оптичних трактів ВОДТ; дрейф параметрів ВОТ при зміні зовнішніх кліматичних умов та інше.

Висновки до розділу 2

1. Технологічні дослідження показують, що ЧЕ високої оптичної якості з кристалів GaAs із оптимальним поєднанням експлуатаційних параметрів можна отримати шляхом виконання цілого ряду операцій: механічна обробка для надання необхідної геометричної форми; кілька етапів механічного полірування та електрополірування.

2. Технологія шліфування та полірування не придатна для виготовлення ЧЕ високої оптичної якості з халькогенідних стекел системи As-Se. Це обумовлено рядом причин: висока крихкість та м'якість цих матеріалів, які часто зумовлюють появу сколів, тріщинок та подряпин на поверхні ЧЕ; неможливість досягнення оптимальної товщини ЧЕ, меншої 1 мм, оскільки тривале хімічне або електрополірування приводять до неконтрольованого розм'якшення матеріалу.

3. ЧЕ необхідної якості із вакуумно напилених плівок системи As-Se можна отримати з товщинами до 3 мкм. Дослідження показують, що діапазон змін оптичного сигналу таких ЧЕ є досить малим. Це обумовлено: недостатньою товщиною чутливої плівки; впливом на проходження оптичного випромінювання всієї системи плівка-підкладка (відбивання на кількох межах розділу, вплив інтерференційних ефектів на плівці, збільшення розсіювання тощо); неконтрольовані зміни величини поглинання плівок, які стимулювалися дією оптичного випромінювання; складність нанесення на поверхню таких плівкових ЧЕ відбиваючих дзеркальних покриттів із-за стимульованої дифузії металів у ЧЕ.

4. З урахуванням приведених труднощів, розроблено технологію виготовлення ЧЕ з халькогенідних стекел системи As-Se методом роздавлення при температурах, близьких до температур склування, який виявився оптимальним для отримання ЧЕ ВОДТ амплітудного типу. Розроблено та виготовлено напівавтоматизований технологічний стенд для контрольованого виготовлення ЧЕ з халькогенідних стекел системи As-Se методом роздавлення.

5. Розроблені і створені стенди для дослідження оптичних параметрів та характеристик ВОДТ та ВОТ на основі спектрофотометра; введено конструктиви для виведення та введення оптичних променів за допомогою ОВ; використано термобокс для досліджень матеріалів та ЧЕ при температурах від 240 К до 450 К; введено конструктиви для підключення до спектрофотометра реальної конструкції ВОДТ.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ПОГЛИНАННЯ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ОПТИЧНИХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ І СХЕМ ТЕРМОМЕТРІВ

При проходженні через напівпровідниковий матеріал фундаментальне поглинання оптичного випромінювання відбувається у випадку, коли енергія його фотонів $h\nu$ більша за ширину забороненої зони матеріалу E_g . При цьому для кристалів типу GaAs та GaP температурна залежність коефіцієнта поглинання $\alpha(T)$ описується простим співвідношенням [36]:

$$\alpha(T) = A \cdot [h\nu - E_g(T)]^{1/2}, \quad (3.1)$$

де A – константа матеріалу;

$E_g(T)$ – ширина забороненої зони при температурі T ;

h – постійна Планка;

ν – частота випромінювання.

У інтервалі температур до 400 К для таких кристалів функція $\Delta E_g(T)$ добре описується математичним виразом:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\gamma T^2}{(\beta + T)}, \quad (3.2)$$

де $E_g(0)$ – ширина заборонної зони при 0 К;

γ і β – емпіричні константи.

Зокрема, для GaAs $E_g(0) = 1,522$ еВ, $\gamma = 5,8 \cdot 10^{-4}$ еВ/К, $\beta = 300$ К, $A = 2,462 \cdot 10^{-4}$ (см·еВ)⁻¹.

Виходячи з рівнянь (3.1) та (3.2), можна знайти загальну функціональну залежність коефіцієнта поглинання кристалів від температури та від енергії фотонів випромінювання:

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{n_c}{E_g(T)} = \frac{n_c}{E_g(0) - \frac{\gamma T^2}{(\beta + T)}}. \quad (3.3)$$

У свою чергу, згідно закону поглинання Ламберта-Бера, зв'язок інтенсивності випромінювання певної довжини хвилі I , яке пройшло через кристалічний ЧЕ товщиною d і його температурою можна записати як:

$$I(\lambda, d, T) = I_0 \cdot [1 - r(\lambda, T)]^2 \cdot \exp[-\alpha(\lambda, T) \cdot d], \quad (3.4)$$

де I_0 – інтенсивність випромінювання, яке падає на зразок.

Принцип роботи досліджуваних нами ЧЕ базується на зміщенні краю власного поглинання матеріалу напівпровідника при зміні його температури (рис.3.1). Як видно із наведених на рисунку графіків, за рахунок зміщення краю поглинання пропускання ЧЕ на фіксованій робочій довжині хвилі λ_0 буде змінюватися при зміні температури. При цьому із виразу (3.4) слідує, що величина оптичного сигналу на виході ЧЕ визначається двома основними функціями: коефіцієнта відбивання вірця ЧЕ $r(\lambda, T)$ та коефіцієнта власного поглинання матеріалу ЧЕ $\alpha(\lambda, T)$ (останній у свою чергу задається через співвідношення (3.3). Знаючи вказані дві оптичні характеристики матеріалу ЧЕ можна проводити теоретичні дослідження передавальної характеристики та експлуатаційних параметрів ВОДТ. Тому частина цієї роботи присвячена спектральним дослідженням напівпровідникових кристалів та стекел, перспективних для використання у якості сенсорів для ВОДТ.

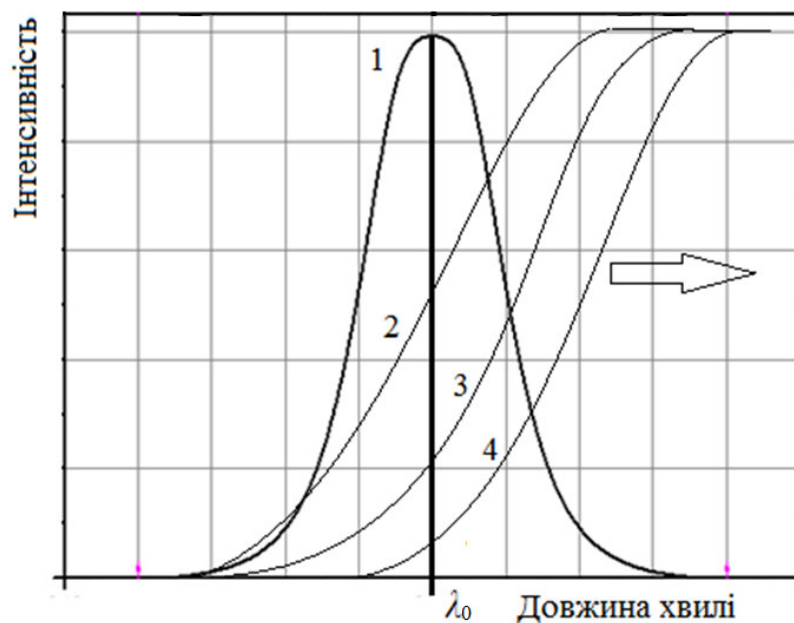


Рис. 3.1. Принцип роботи ВОДТ амплітудного типу: 1 – спектр випромінювання джерела світла; 2, 3, 4 - залежність оптичного пропускання матеріалу від довжини хвилі λ_r при різних температурах $T_2 < T_3 < T_4$

3.1. Дослідження спектрів пропускання кристалів GaP та GaAs

Для оптичних ЧЕ ВОДТ амплітудного типу основні експлуатаційні параметри визначаються характером температурних змін положення краю поглинання матеріалу ЧЕ та величиною його спектрального зсуву при цьому. Для отриманих за оптимальною технологією ЧЕ із кристалів GaP (товщини взірців від 300 до 500 мкм) результати досліджень спектрів пропускання наведені на рис. 3.2.

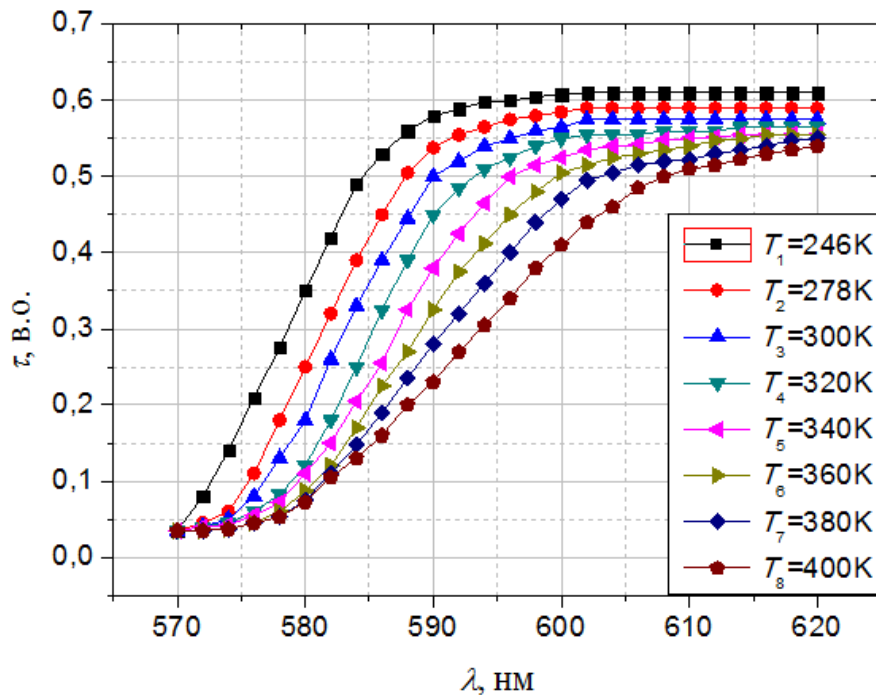


Рис. 3.2. Спектри пропускання τ ЧЕ із кристалу GaP (товщина 300 мкм) в області краю поглинання при різних температурах (T)

Із наведених графіків видно, що із збільшенням температури ЧЕ GaP його край пропускання зсувається в довгохвильову область. Одночасно спостерігається суттєве зменшення крутизни краю пропускання S_k із незначним спаданням загального рівня пропускання в області довгих хвиль. Розраховані за лінійними ділянками краю пропускання значення його крутизни наведені в таблиці 3.1. Їх порівняння із літературними даними [37] показує хорошу узгодженість величини крутизни краю пропускання кристалів GaP, отриману різними дослідниками та нами.

Для моделювання процесів функціонування ВОДТ та розрахунків їхніх експлуатаційних параметрів необхідні дані про величину коефіцієнта оптичного поглинання матеріалу ЧЕ для різних енергій фотонів випромінювання. Тому нами за даними рис. 3.2 були розраховані спектри оптичного поглинання ЧЕ при різних температурах.

Таблиця 3.1

Крутизна краю оптичного пропускання ЧЕ GaP при різних температурах

T, K	246	278	300	320	340	360	380	400
$S_k, (в.о.)/нм$	0,035	0,033	0,031	0,029	0,025	0,021	0,019	0,016

Спектр краю оптичного поглинання досліджувався в інтервалі температур 246 – 400 К за допомогою спектрофотометра СФ-47 модифікованого для даних досліджень (див. розділ 2). Коефіцієнт поглинання α , як функція від пропускання τ і відбивання поверхні r розраховувалися за добре відомою формулою [38]:

$$\alpha = \frac{1}{d_p} \ln \left\{ \frac{(1-r)^2}{2\tau} + \sqrt{\left[\frac{(1-r)^2}{2\tau} \right]^2 + r^2} \right\}, \quad (3.5)$$

де d_p визначає розмір зразка паралельний товщині взірця. Відносна похибка при вимірюваннях поглинання $\Delta\alpha/\alpha$ не перевищувала 10% при $0,3 \leq \alpha d_p \leq 3$ см. Для вимірювань низьких температур застосовувався криостат на базі мікрохолодильника ТЛМ та блока живлення ВСП-33ю (див. розділ 2), забезпечуючи стабілізацію температури в межах 0,1 К.

Результати проведених розрахунків наведені на рис.3.3.

Оптичне поглинання в легованих кристалах GaP за літературними даними [39] обумовлене непрямозонними переходами носіїв заряду. Даний механізм визначає залежність величини поглинання в області краю від енергії фотонів випромінювання у вигляді функції:

$$\alpha^2 = \alpha_0^2 [h\nu - E_g] \quad (3.6)$$

Із наведеного співвідношення слідує проста процедура визначення ширини непрямой забороненої зони E_g , та коефіцієнта α_0 ЧЕ для легованих кристалів GaP при різних температурах. Вона ґрунтується на побудові графіків залежностей $\alpha^2 = f(h\nu)$, які наведені на рис.3.4. Із цих графіків шляхом екстраполяції їхніх лінійних ділянок до величини $\alpha = 0$ визначені величини E_g , та α_0 ЧЕ із кристалів GaP при різних температурах. Отримані дані наведені в таблиці 3.2. Їхній аналіз показує, що із ростом температури як ширина забороненої зони, так і параметр α_0 зменшуються за дуже близьким до лінійного законом. При цьому термічні коефіцієнти таких змін $\Delta E_g/\Delta T = 6 \cdot 10^{-4}$ еВ/К та $\Delta\alpha/\Delta T = 12,5$ см⁻¹/К. Дуже близькі до наших результати отримані і авторами експериментальних робіт [40].

Таблиця 3.2

Параметри спектру краю поглинання ЧЕ GaP при різних температурах

T, K	246	278	300	320	340	360	380	400
E_g, eV	2,15	2,13	2,12	2,11	2,10	2,08	2,07	2,06
α_0, cm^{-1}	$6,88 \cdot 10^3$	$5,53 \cdot 10^3$	$4,89 \cdot 10^3$	$4,49 \cdot 10^3$	$4,22 \cdot 10^3$	$3,99 \cdot 10^3$	$3,71 \cdot 10^3$	$3,48 \cdot 10^3$

З рис. 3.4 видно, що ВОДТ аналогового типу на основі ЧЕ із кристалів GaP можуть ефективно функціонувати із робочим оптичним випромінюванням з довжинами хвиль від 585 до 600 нм. Саме в цьому частотному діапазоні спостерігаються найбільш чітко виражені закономірні зміни пропускання ЧЕ із зміною їх температури. Для виявлення в цьому частотному діапазоні оптимальних довжин хвиль близького до монохроматичного робочого випромінювання ВОДТ на основі даних рис. 3.4 були побудовані температурні залежності пропускання ЧЕ для чотирьох фіксованих λ : 585 нм, 590 нм, 595 нм і 600 нм. Отримані нами залежності наведені на рис. 3.5.

Із даних графіків видно, що лише для $\lambda = 590$ нм характерний практично лінійний закон температурних змін пропускання ЧЕ із кристалів GaP.

Апроксимація методом найменших квадратів дає із відносною похибкою 1,5 % для такої залежності математичну функцію:

$$\tau(T) = S_T \cdot T + A_0, \quad (3.7)$$

де S_T – середня температурна чутливість ЧЕ;

A_0 – деякий параметр, який умовно відповідає пропусканню ЧЕ при абсолютному нулю температур.

Для інших довжин хвиль у діапазоні від 300 К до 400 К температурні залежності пропускання ЧЕ із кристалів GaP в тій або іншій мірі відрізняються від лінійних. Особливо значне відхилення спостерігається при $\lambda = 585$ нм. Однак при зменшенні температурного інтервалу ΔT на одержаних графіках можна виділити хороші прямолінійні ділянки. Результати лінійної апроксимації експериментальних результатів на цих ділянках лінійною функцією (3.7) наведені в таблиці 3.3. У цій таблиці наведені також розраховані максимальні відхилення $\Delta\tau_{\max}$ значень експериментальних точок від лінійної апроксимаційної функції.

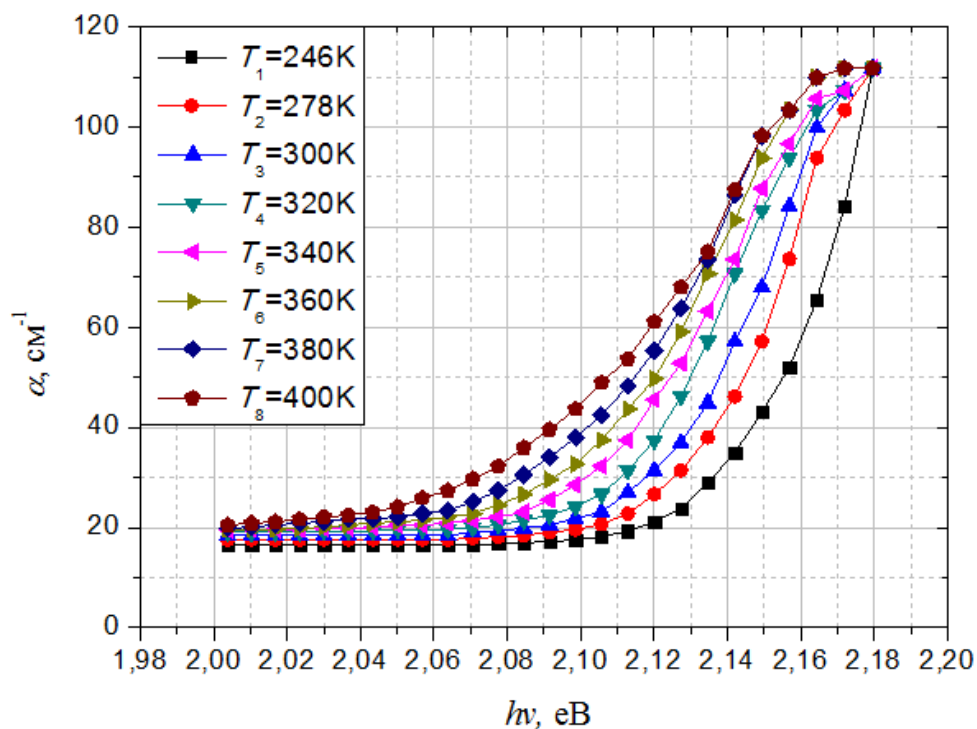


Рис. 3.3. Спектральні залежності коефіцієнта оптичного поглинання α ЧЕ із кристалів GaP при різних температурах

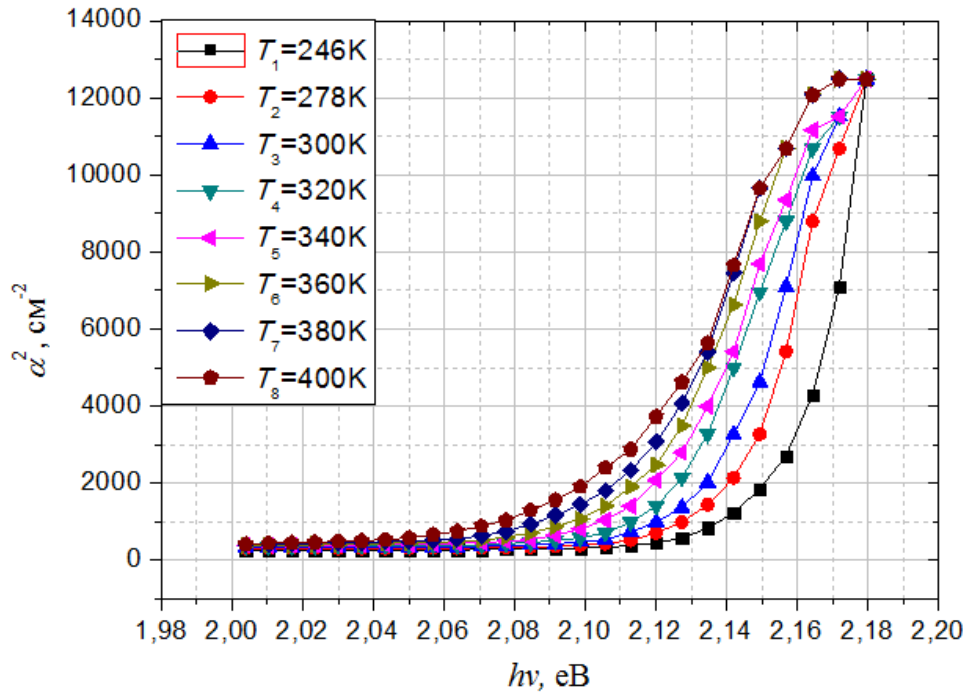


Рис. 3.4. Спектральні залежності квадрата коефіцієнта поглинання кристалів GaP при різних температурах

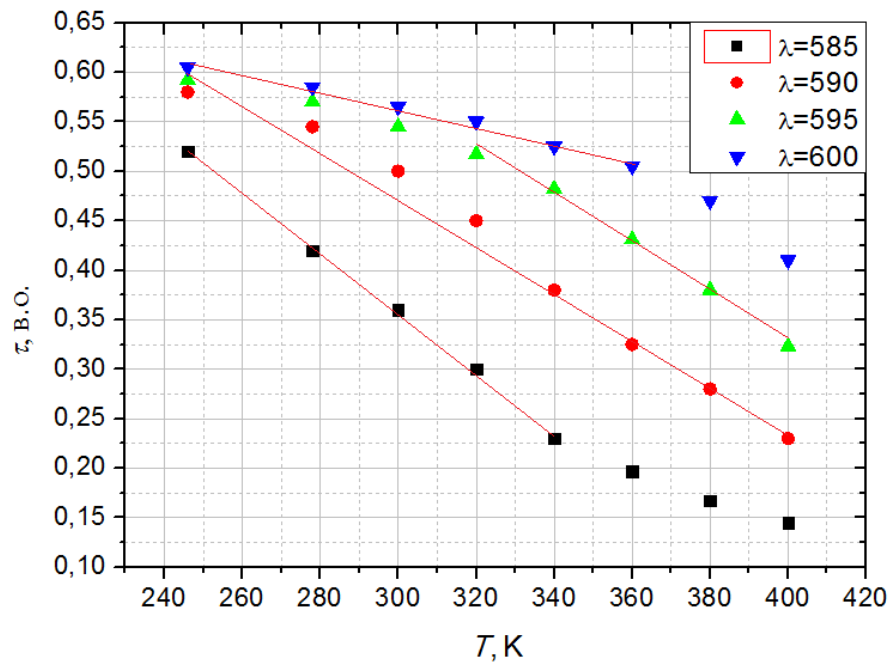


Рис. 3.5. Температурні характеристики ЧЕ із кристалів GaP на чотирьох фіксованих робочих довжинах хвиль

Таким чином, відповідно із проведеним аналізом, оптимальна робоча довжина хвилі оптичного випромінювання у ВОДТ на базі кристалів GaP лежить біля значення $\lambda = 590$ нм. На цій довжині хвилі для ЧЕ із GaP

характерним є значення температурної чутливості $S_T = 2,42 \cdot 10^{-3}$ (в.о.)/К, найбільш широкий робочий температурний інтервал проведення вимірювань $\Delta T = 154$ К та мінімальне відхилення від лінійності температурної характеристики з величиною параметра $\Delta\tau_{\max} = 0,027$ в.о. На інших робочих довжинах хвиль експлуатаційні параметри ЧЕ із кристалів GaP будуть гіршими. Це суттєво обмежує та ускладнює вибір джерел випромінювання та фотоприймачів для ВОТ на основі таких ЧЕ.

Добре відомі температурні оптичні сенсори пропускаючого і відбиваючого типу на основі пластин кристалів GaAs [40-44]. Однак результатів надійних комплексних досліджень спектрів пропускання цих матеріалів у широкому температурному діапазоні нами не виявлено. Тому такі дослідження проведені нами для ЧЕ із легованих кристалів GaAs (товщини взірців від 300 до 500 мкм). Результати досліджень температурних змін спектрів пропускання наведені на рис. 3.6.

Із наведених вище графіків видно, що, як і для більшості інших напівпровідникових матеріалів, із збільшенням температури ЧЕ GaAs його край пропускання зсувається в довгохвильову область. При цьому, на відміну від GaP, температурний зсув краю не супроводжується помітними змінами його форми. Значно ширшою для GaAs є й спектральна область, у якій відбувається переміщення краю (біля 100 нм), порівнюючи з кристалами GaP (~ 40 нм). Це вказує на можливість досягнення кращої чутливості ЧЕ із GaAs.

Таблиця 3.3

Середня температурна чутливість S_T та параметр A ЧЕ із GaP для різних робочих довжин хвиль

λ , нм	585	590	595	600
ΔT , К	246 - 340	246 - 400	320 - 400	246 - 360
S_T , (в.о.)/К	$3,04 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$0,89 \cdot 10^{-3}$
A_0 , в.о.	1,268	1,206	1,309	0,828
$\Delta\tau_{\max}$, в.о.	0,013	0,028	0,011	0,012

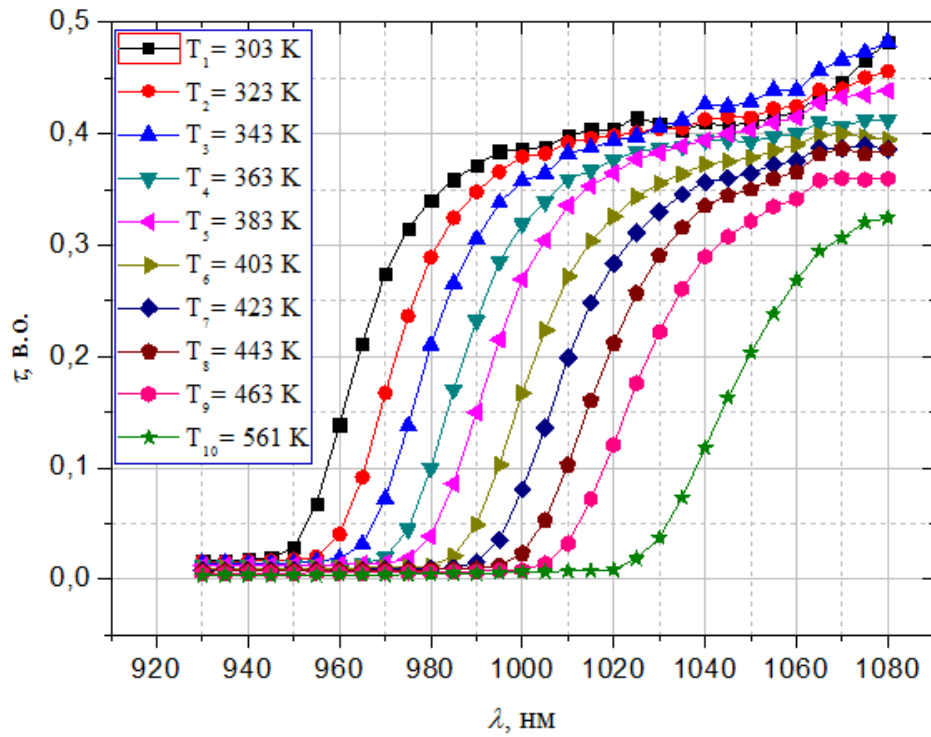


Рис. 3.6. Спектри пропускання τ ЧЕ із кристалу GaAs (товщина 300 мкм) в області краю поглинання при різних температурах (T)

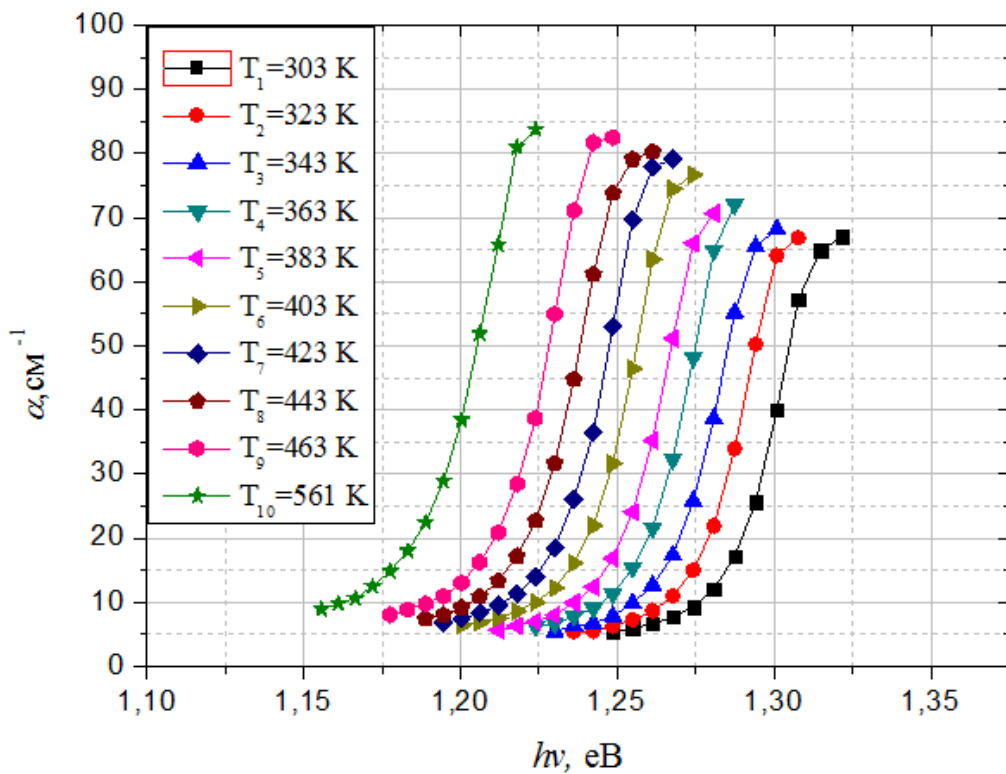


Рис. 3.7. Спектральні залежності коефіцієнта оптичного поглинання α ЧЕ із кристалів GaAs при різних температурах

Відповідні залежність α оптичного краю поглинання кристалів GaAs наведені на рис. 3.7. На основі таких експериментальних даних було проведено моделювання та теоретичні розрахунки параметрів ЧЕ ВОДТ із цих кристалів за методикою, яка детально описана вище при аналізі ЧЕ із GaP. Отримано, що для GaAs ширина оптичної забороненої 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, а температурний коефіцієнт ширини забороненої зони рівний $5,1 \cdot 10^{-4}$ еВ/К.

3.2 Встановлення оптимального для ВОДТ діапазону хімічних складів стекол системи As-Se

Використання в якості ЧЕ халькогенідних стекол системи As-Se зумовлено оптимальним поєднанням в даних матеріалах цілого ряду позитивних якостей, з точки зору конструювання ВОДТ. Аналіз літературних джерел та проведені нами технологічні дослідження дозволяють відмітити основні із цих якостей: достатня крутизна краю оптичного поглинання, розміщення цього краю в інфрачервоній області, величина показника заломлення підходить для доброго узгодження з ОВ, ширина забороненої зони відповідає високому пропусканню у спектральному діапазоні прозорості, можливість у широких межах варіювати хімічний склад (а, відповідно, і властивості) ЧЕ за рахунок широкої області склоутворення, добре виражена залежність положення краю поглинання від хімічного складу стекол, простота технології виготовлення (як самих стекол, так і ЧЕ на їх основі), невисокі температури склування та інше. Відмітимо також, що стекла As-Se прозорі в інфрачервоній області спектру від 0,85 мкм до 14 мкм. Їх коефіцієнт відбивання знаходиться в межах від 20 % до 25 %. Вагомим позитивом є також добре розроблена технологія синтезу цих стекол, з яких у подальшому виготовляються взірці ЧЕ.

У таблиці 3.4 наведені деякі важливі параметри використаних нами стекол системи As-Se, які були необхідні нам для технологічних досліджень,

теоретичних розрахунків та оптимізації конструкцій ЧЕ ВОДТ. Дані скла отримувались за стандартною методикою, наведеною в розділі 2.

Таблиця 3.4

Деякі фізичні параметри використаних нами стекел As_xSe_{100-x} [31]

x , ат.%	Густина ρ , г/см ³	Мікротвердість H , кг/мм ²	Границя пропускання світла, мкм
50,0	4,52	97	0,70
40,0	4,55	150	0,74
30,0	4,54	112	0,73
20,0	4,44	87	0,73
10,0	4,40	65	0,78
7,7	4,34	59	0,75
4,8	4,33	52	0,74
0	4,29	42	0,75

Як видно із таблиці, край поглинання світла всіх стекел системи As-Se лежить у діапазоні довжин хвиль від 0,73 мкм до 0,78 мкм. Теоретично спектр області краю поглинання для матеріалів у склоподібному стані добре описується правилом Урбаха [45]:

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{-\gamma(E_g - h\nu)}{kT}\right], \quad (3.8)$$

де ν - частота світла; E_g - ширина забороненої зони; T – абсолютна температура; γ - деяка постійна; α_0 – повільно змінна функція частоти.

При енергії фотонів більшій 2 еВ спектр поглинання краще екстраполюється функцією:

$$\alpha(h\nu) \approx \alpha(h\nu - E_g)^2. \quad (3.9)$$

Використовуючи вказані функціональні залежності в роботах [46-49] різними методами експериментально визначались оптичні ширини забороненої

зони E_g стекол системи As-Se різного хімічного складу при кімнатній температурі. При цьому у більшості випадків величина E_g бралась як енергія фотонів, при якій $\alpha = 10^3 \text{ см}^{-1}$. (рис. 3.7). Аналіз результатів досліджень різних авторів показує хорошу узгодженість величин E_g , визначених різними методами [49]. Усереднені дані результатів досліджень наведені на рис. 3.8. Відмітимо також, що ширина забороненої зони для непрямих оптичних переходів при 77 К у кристалічному As_2Se_3 рівна $E_g = 2,1$ еВ або 2,0 еВ для різних поляризаційних співвідношень падаючого променя [50].

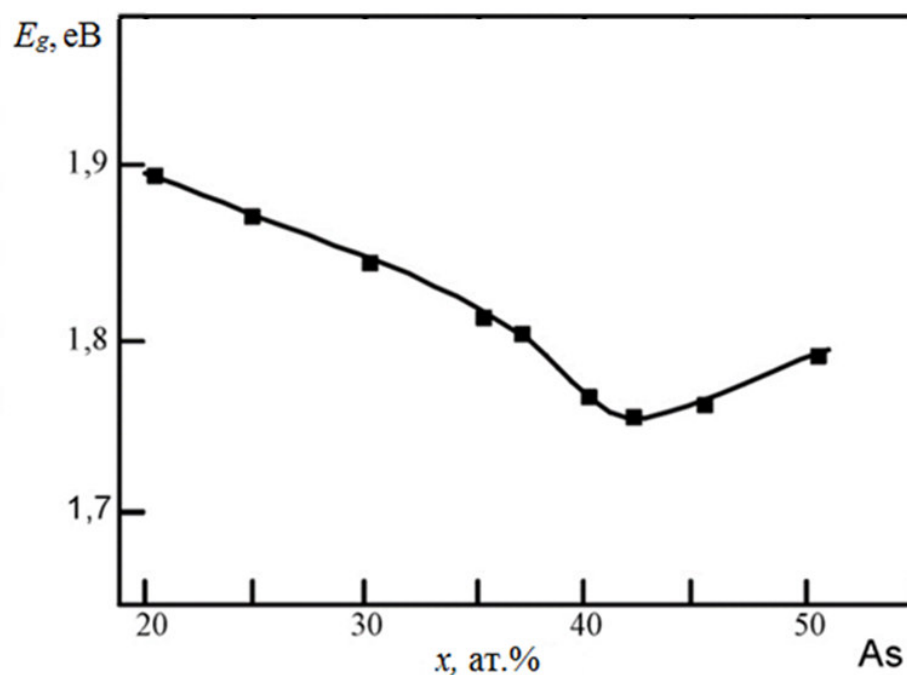


Рис. 3.8. Концентраційна залежність оптичної ширини забороненої зони E_g для стекол $\text{As}_x\text{Se}_{100-x}$ [50]

Особливо важливою якістю стекол As-Se є можливість змінювати положення їхнього краю власного оптичного поглинання за рахунок варіації хімічного складу матеріалу. Це дозволило б дуже легко проводити оптимальне спектральне узгодження всіх елементів оптичної схеми ВОДТ: джерела випромінювання, приймача, ЧЕ та ОВ. Для виявлення практичної можливості такої оптимізації ми провели спектральні дослідження краю оптичного поглинання взірців ЧЕ із стекол системи As-Se для різних хімічних складів із всієї області склоутворення.

Проведені нами дослідження показали, що стекла із вмістом селену більше 75 ат. % є не бажаними матеріалами ЧЕ для ВОДТ. Це обумовлено кількома причинами:

- їхні температури склування дуже малі (менше 370 К), що суттєво зменшує діапазон вимірювань температури ВОТ;
- структура таких стекел дуже нестабільна і при нагріві у них проходять незворотні структурні зміни та деградація оптичних параметрів;
- відносно мала крутизна краю поглинання, що зменшує чутливість ВОДТ.

Непридатними для ЧЕ виявилися і стекла As_xSe_{100-x} із $x > 65$ ат.%, оскільки при температурах біля 400 К в них ініціювалися кристалізаційні процеси і суттєва деградація оптичних властивостей.

Враховуючи перераховані вище експериментальні дані ми зробили висновок, що в якості ЧЕ для ВОДТ доцільно використовувати халькогенідні стекла системи As-Se лише із концентрацією атомів миш'яку від 25 до 65 ат. %. Результати наших спектральних досліджень краю оптичного поглинання ЧЕ із окремих стекел із вибраного діапазону хімічних складів наведено на рис. 3.9.

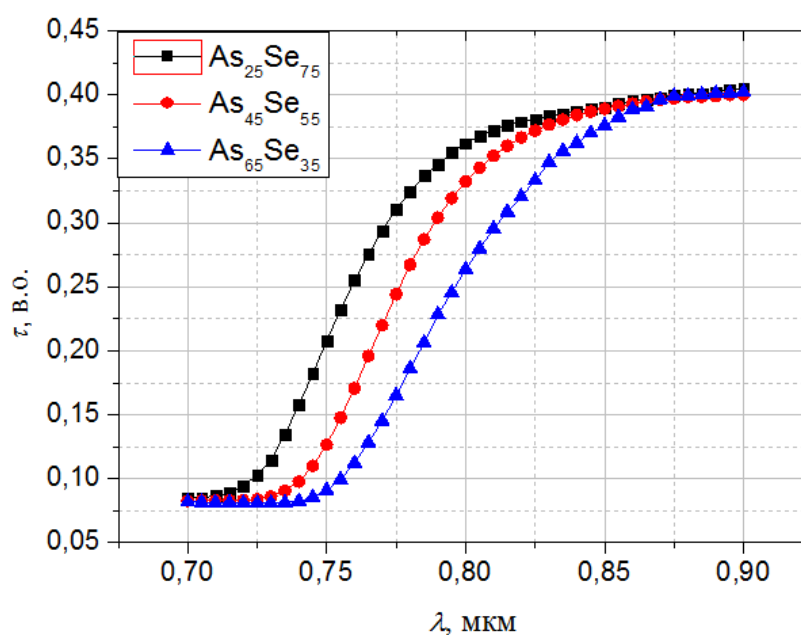


Рис. 3.9. Краї поглинання при кімнатній температурі взірців ЧЕ (товщина 0,6 мм) із стекел As_xSe_{100-x} різних хімічних складів

Як слідує із наведених спектрів, краї спектру пропускання ЧЕ лежать у діапазоні довжин хвиль від 0,72 мкм до 0,76 мкм (за початком мінімуму пропускання на рівні $\tau \approx 7\%$) або від 0,77 мкм до 0,82 мкм (за початком переходу в область максимуму прозорості на рівні $\tau \approx 35\%$). Із збільшенням у складі матеріалу ЧЕ концентрації атомів миш'яку, їхній спектр пропускання в області краю фундаментального поглинання зсувається у сторону більших довжин хвиль. Порівняння із спектрами пропускання кристалів GaP показує, що при на порядок більших товщинах ЧЕ із стекел As_xSe_{100-x} вони мають такий самий діапазон температурних змін пропускання, як і в ЧЕ із GaP.

Для визначеного оптимального діапазону складів величина диференціального зсуву краю лежить біля 1 нм/ат.%. При цьому для взірців ЧЕ із стекел з $x > 50$ ат.% нахил краю поглинання стає пологішим, у порівнянні із взірцями із стекел з меншим вмістом миш'яку. Для досліджених ЧЕ товщиною 0,6 мм максимум пропускання фіксується на рівні біля 40%. Зменшуючи товщину взірців ЧЕ до 0,3 мм, можна було підвищити цей рівень до величин $\tau \approx 55\%$. Але при цьому погіршувалися інші технічні параметри ЧЕ.

При збільшенні температури ЧЕ із стекел As-Se їхнє пропускання зменшується. Тому при мінімальній температурі робочого інтервалу ВОТ взірці ЧЕ повинні мати максимальне пропускання. Оскільки досліджувані нами ВОТ призначені для вимірювання температур починаючи від -20°C , то взірці ЧЕ з оптимального матеріалу мають мати такий край оптичного поглинання, щоб робоча довжина хвилі джерела випромінювання приладу відповідала положенню верхньої межі величини пропускання ЧЕ. Бажано також, щоб робоча довжина хвилі при -20°C знаходилася близько до лінійної ділянки спектру пропускання ЧЕ. Зокрема, відповідно до рис.3.9, оптимальна робоча довжина хвилі джерела випромінювання та приймача лежить біля 0,8 мкм для ЧЕ із скла $As_{45}Se_{55}$ та 0,86 мкм для ЧЕ із скла $As_{25}Se_{75}$.

Верхня межа вимірюваних температур ВОТ на основі стекел As-Se визначається двома основними параметрами: температурою склування матеріалу ЧЕ та величиною його пропускання при цій температурі. Найвищою

є температура склування для стекел $As_{45}Se_{55}$, величина якої трохи перевищує $170\text{ }^{\circ}C$ (див. розділ 2). Дослідження [51,52] також показали, що кристалізація даних стекел розпочинається при температурах, більших T_g . Таким чином, встановлений нами оптимальний хімічний склад халькогенідних стекел $As_{45}Se_{55}$ дозволяє розробляти ВОТ для вимірювання температур до $170\text{ }^{\circ}C$. Нижнє можливе граничне значення діапазону вимірюваних температур для даних приладів нами не було визначене, оскільки для цього потрібні спектральні дослідження при температурах, нижчих - 246 K .

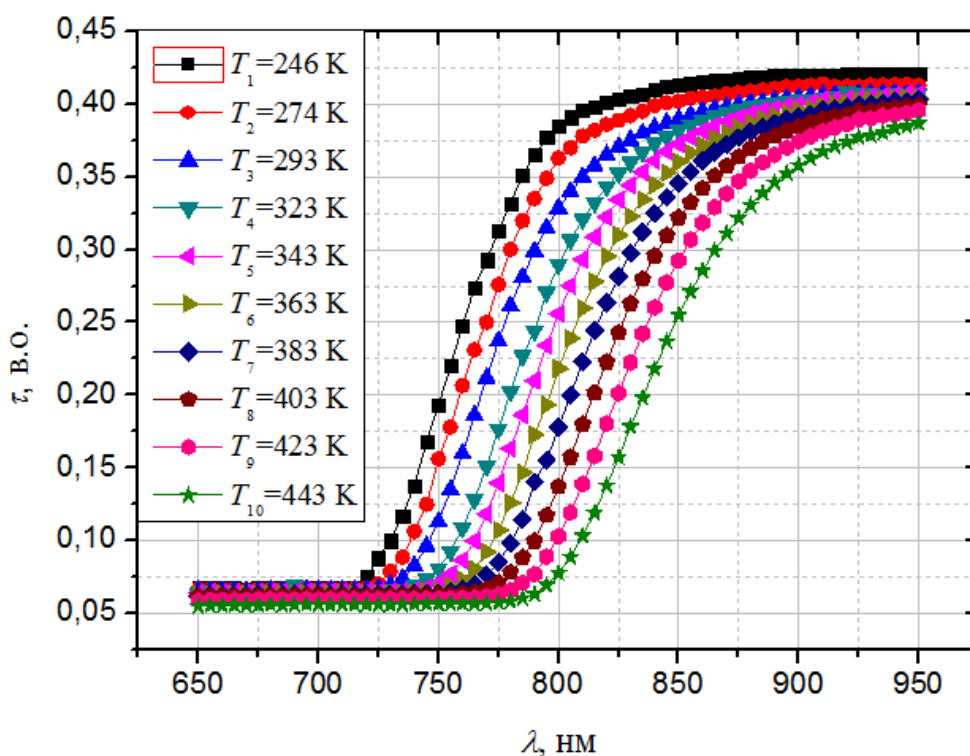


Рис. 3.10. Спектральні залежності пропускання ЧЕ із скла $As_{45}Se_{55}$ (товщина $0,6\text{ mm}$) при різних температурах

Для визначання оптимальних значень інших експлуатаційних параметрів ВОДТ ми провели температурні дослідження зсуву краю пропускання ЧЕ із халькогенідних стекел різних хімічних складів. Для матеріалу $As_{45}Se_{55}$ результати таких досліджень наведено на рис.3.10. Як видно, при збільшенні температури від $-20\text{ }^{\circ}C$ до $170\text{ }^{\circ}C$ пропускання ЧЕ із скла $As_{45}Se_{55}$ на фіксованій робочій довжині хвилі $0,805\text{ }\mu\text{m}$ зменшується від 38% до 7% . При цьому нижня межа величини пропускання ЧЕ 7% є достатньою для реєстрації

оптичного сигналу від ВОДТ фотодіодом. Відмітимо також, що зменшення товщини ЧЕ до величини біля 0,4 мм дозволяє підвищити цю межу з 7 % до 13 %.

Таким чином хімічний склад ЧЕ $As_{45}Se_{55}$ є оптимальним з точки зору забезпечення максимально можливого для матеріалів системи As-Se температурного діапазону проведення вимірювань ВОТ: від $-20\text{ }^{\circ}C$ до $170\text{ }^{\circ}C$. Тому надалі в роботі викладемо основні результати наших досліджень саме для ЧЕ $As_{45}Se_{55}$. Для ЧЕ із халькогенідних стекел інших хімічних складів результати досліджень ВОТ якісно є тотожними, але відрізняються кількісними параметрами ВОДТ. Відмітимо також, що виміряний нами за допомогою гоніометра Г-5 в області прозорості показник заломлення стекел $As_{45}Se_{55}$ становить $n = 2,774$.

Результати рис. 3.11 показують, що ВОДТ аналогового типу із ЧЕ із скла $As_{45}Se_{55}$ можуть розроблятися для вузького діапазону робочого оптичного випромінювання з довжинами хвиль від 800 до 815 нм. Лише в цьому частотному діапазоні можна забезпечити максимальний інтервал вимірювання температур від $-20\text{ }^{\circ}C$ до $170\text{ }^{\circ}C$. ВОТ із робочими довжинами хвиль оптичного тракту за межами вказаного спектрального діапазону матимуть вужчий вимірювальний температурний інтервал. Для встановлення у вказаному частотному діапазоні оптимальних довжин хвиль роботи ВОДТ ми на основі даних рис. 3.10 розраховали температурні характеристики, аналогічно побудованим для кристалічних ЧЕ. Дані характеристики для ЧЕ із стекел $As_{45}Se_{55}$ для чотирьох фіксованих λ : 800 нм, 805 нм, 810 нм і 815 нм наведені на рис. 3.11.

Із температурних характеристик видно, що при температурах менших 300 К спостерігається сильне відхилення експериментальних точок від приблизно лінійного розміщення. Тому ми виключили такі точки із послідуєчого математичного апроксимаційного аналізу. Відповідно, прямими лініями на рис. 3.11 відмічені результати лінійної апроксимації експериментальних результатів із представленням оптичного пропускання на

кожній робочій довжині хвилі введеними раніше функціями пропускання $\tau(T) = S_T \cdot T + A_0$. Отримані у процесі математичної апроксимації значення величин S_T та A_0 для ЧЕ із стекл $As_{45}Se_{55}$ на різних робочих довжинах хвиль наведені в таблиці 3.5. У цій таблиці також наведені розраховані максимальні відхилення значень експериментальних точок від лінійної апроксимаційної функції $\Delta\tau_{\max}$.

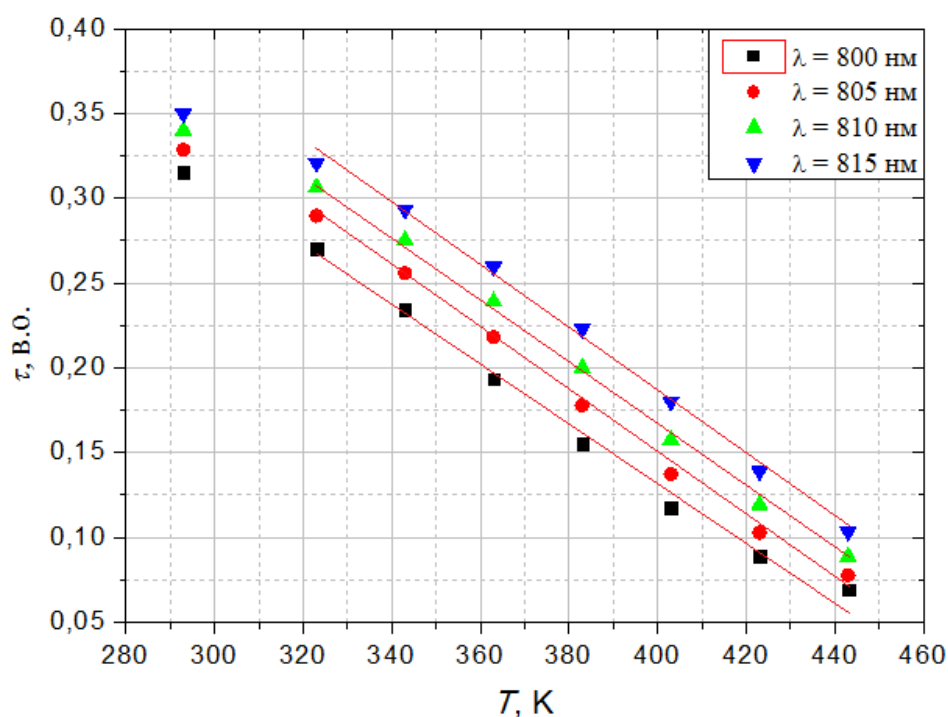


Рис. 3.11. Температурні характеристики ЧЕ із стекл $As_{45}Se_{55}$ на чотирьох фіксованих робочих довжинах хвиль

Таблиця 3.5

Середня температурна чутливість S_T та параметр A_0 ЧЕ із стекл $As_{45}Se_{55}$ для різних робочих довжин хвиль

λ , нм	800	805	810	815
S_T , (в.о.)/К	$1,83 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$
A_0 , в.о.	0,879	0,914	0,929	0,930
$\Delta\tau_{\max}$, в.о.	0,011	0,013	0,140	0,017

Таким чином, відповідно із проведеним аналізом, оптимальна робоча довжина хвилі оптичного випромінювання у ВОДТ на базі стекол As-Se лежить біля значення $\lambda = 805$ нм. На цій довжині хвилі для ЧЕ характерним є максимальний температурний діапазон вимірювань, високе значення температурної чутливості $S_T = 1,87 \cdot 10^{-3}$ (в.о.)/К та мінімальне відхилення від лінійності температурної характеристики з величиною параметра $\Delta\tau_{\max} = 0,011$ в.о.

3.3 Теоретичний аналіз краю оптичного поглинання скла $As_{45}Se_{55}$

Для аналізу експлуатаційних параметрів ВОДТ необхідно мати спектральну та температурну залежність коефіцієнта оптичного поглинання у вигляді явної математичної функції. Для цього наведені на рис.3.10 експериментальні графічні залежності пропускання були математично оброблені за методикою, яка використовувалась нами у роботах [53] для спектральних досліджень легованих кристалів GaAs та GaP. Для цього ми використали співвідношення (3.9), характерне для матеріалів із розупорядкованою структурою в області відносно невеликих значень величини α до 100 см^{-1} (край Урбаха) [54]. Саме в цій області працюють ЧЕ ВОДТ і спектральна поведінка оптичного поглинання тут добре описується експоненціальною функцією двох змінних: енергії фотонів випромінювання та температури. Для відображення цього факту формулу (3.8) запишемо в трохи видозміненому вигляді:

$$\alpha(h\nu, T) = A(T) \exp\left(\frac{h\nu - E_g(T)}{E_0(T)}\right), \quad (3.10)$$

де $E_0(T)$ - характеристична енергія краю Урбаха, як функція температури матеріалу ЧЕ. Таку математичну функцію часто використовують для аналізу оптичного поглинання як легованих кристалів, так і стекол [53].

Для застосування вибраної математичної моделі оптичного поглинання ЧЕ ми розрахували спектральну залежність коефіцієнта поглинання скла

As₄₅Se₅₅ при різних температурах із спектрів пропускання ЧЕ. Отримані залежності наведені на рис. 3.12 – розраховані тільки у вузькому діапазоні температур.

У співвідношення (3.10) входить три параметри, які є функціями температури. Проводити математичний аналіз одночасно для всіх їх досить складно. Тому більшість дослідників у такому випадку на першому етапі визначають із експериментальних спектрів псевдощільну забороненої зони $E_g(T)$ при відповідних температурах. При цьому умовно величину $E_g(0)$ беруть як точку перетину графіка лінійної апроксимації краю поглинання з віссю енергії фотонів. Для отримання ж більш різкого краю α та більш чіткого проведення екстраполяційної прямої застосовують залежності $\alpha = f(h\nu)$. За такою методикою були визначені оптичні ширини заборонених зон скла As₄₅Se₅₅ при різних температурах й у нашій роботі.

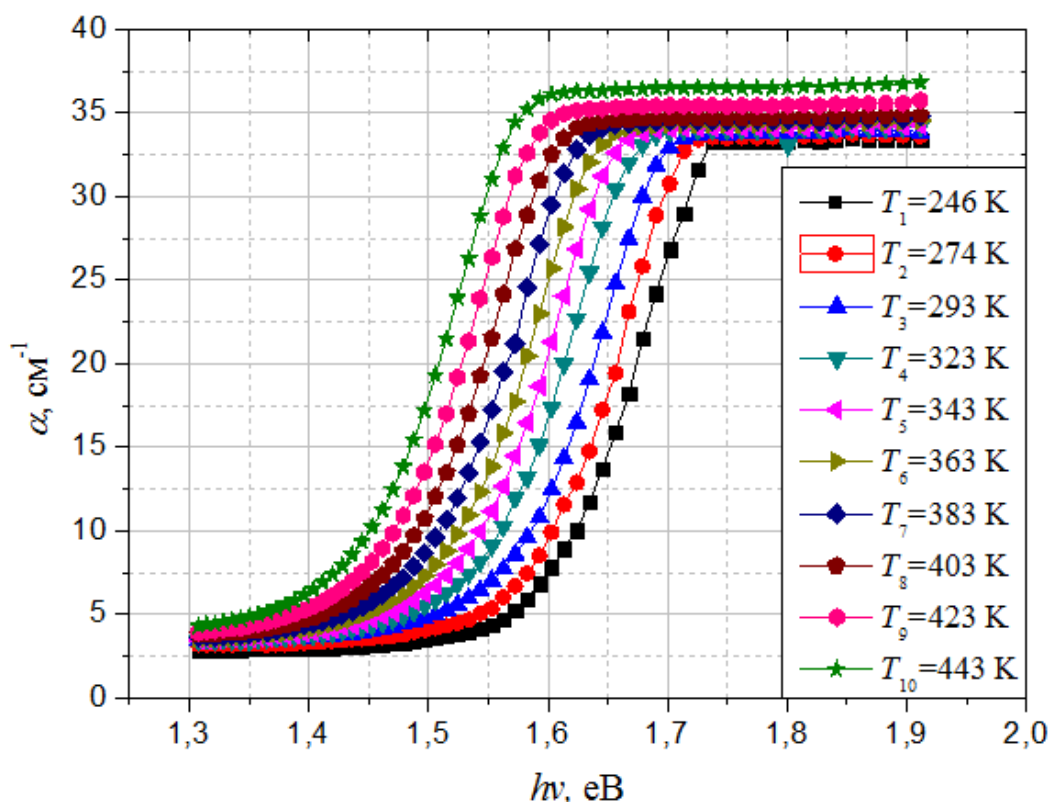


Рис 3.12. Спектральні залежності коефіцієнта оптичного поглинання
стекол As₄₅Se₅₅ при різних температурах

Для послідуєчого теоретичного аналізу співвідношення (3.10) зручніше застосовувати в перетвореному вигляді:

$$\ln[\alpha(h\nu, T)] = \ln[A(T)] + \left(\frac{h\nu - E_g(T)}{E_0(T)} \right) = \ln[A(T)] + B(T) \cdot h\nu + E(T) \approx A''(T) + B(T) \cdot h\nu. \quad (3.11)$$

У такому випадку ми отримуємо для кожної температури лінійну залежність натурального логарифма коефіцієнта поглинання від енергії фотонів. Параметри такої лінійної залежності:

$$A''(T) = \ln[A(T)] - E_g(T)/E_0(T) \quad \text{та} \quad B(T) = 1/E_0(T) \quad (3.12)$$

у свою чергу є функціями температури.

Таблиця 3.6

Параметри інтерполяції коефіцієнта поглинання стекол $As_{45}Se_{55}$ логарифмічною функцією (3.12) та визначені із них параметри краю Урбаха

T, K	$A''(T), \text{в.о.}$	$B(T), \text{eV}^{-1}$	$E_0(T), \text{eV}$	$E_g(T), \text{eV}$	$E_g(T)/E_0$	$A(T), \text{см}^{-1}$
246,00	-18,75	12,98	0,0770	1,630	21,17	11,2
274,00	-18,16	12,79	0,0785	1,610	20,51	11,5
293,00	-17,54	12,54	0,0795	1,595	20,06	11,6
323,00	-16,89	12,33	0,0810	1,575	19,44	11,8
343,00	-16,61	12,21	0,0820	1,560	19,02	12,1
363,00	-16,21	12,04	0,0830	1,545	18,61	12,3
383,00	-15,63	11,85	0,0840	1,530	18,21	12,6
403,00	-15,32	11,69	0,0850	1,510	17,75	12,7
423,00	-14,83	11,55	0,0860	1,490	17,33	13,2
443,00	-14,31	11,45	0,0870	1,470	16,90	13,3

Графічно результат такого логарифмічного представлення краю поглинання в області величин до 100 см^{-1} для однієї з температур (403К) наведено на рис. 3.13. Із графіка слідує хороша точність інтерполяції експериментальних результатів краю поглинання стекол $As_{45}Se_{55}$. При цьому

максимальне відхилення процесу інтерполяції краю при всіх температурах не перевищує величини 0,1276 для $A''(T)$ та 0,0511 для $B(T)$. Значення отриманих параметрів інтерполяції краю поглинання кристалів при різних температурах наведено в таблиці 3.6.

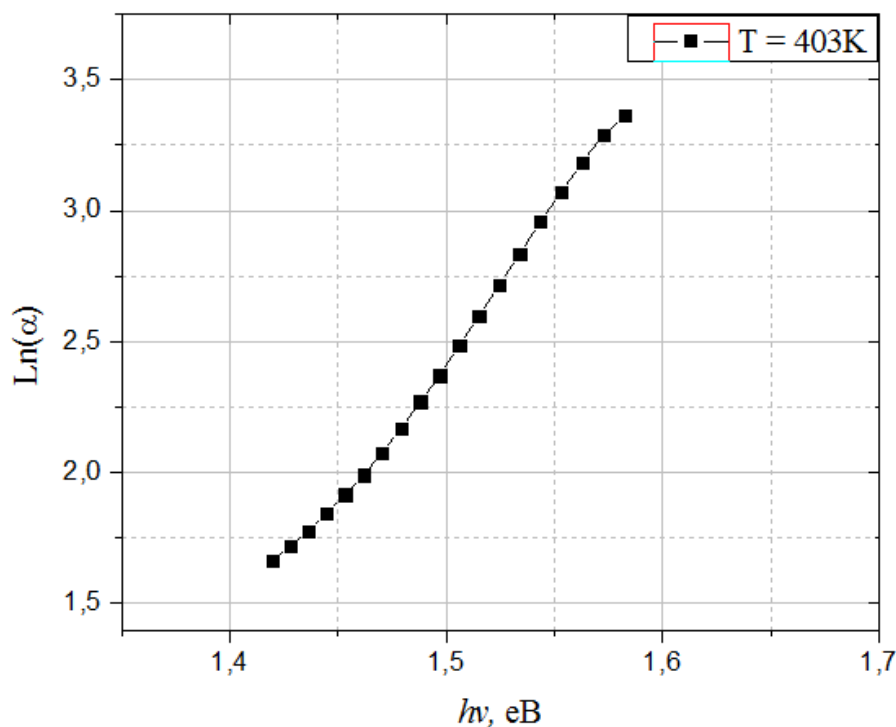


Рис. 3.13. Логарифмічне представлення краю для температури 403К

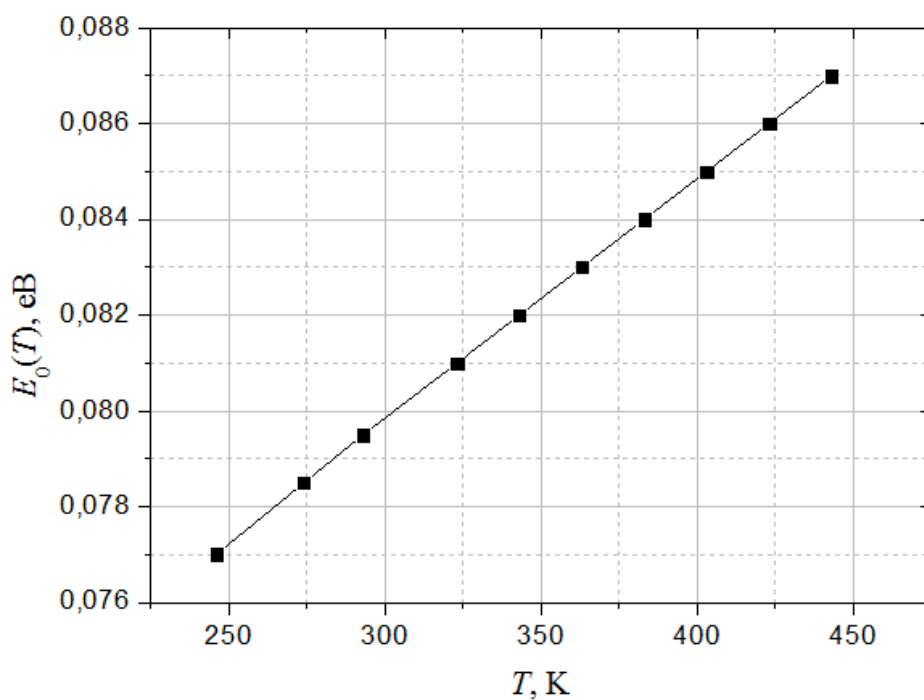


Рис. 3.14. Температурна залежність параметра E_0 для стекол $As_{45}Se_{55}$

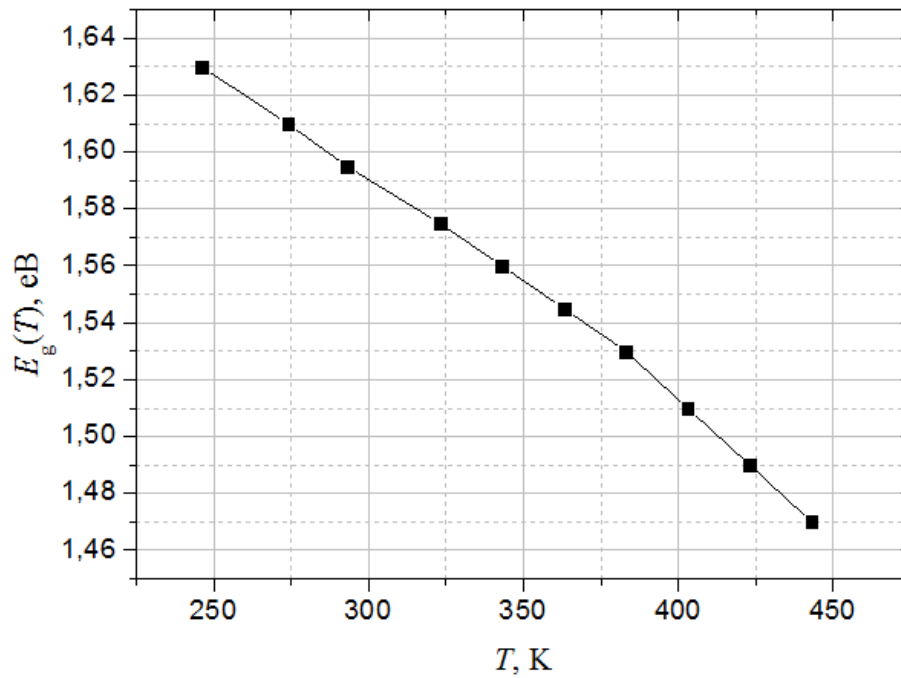


Рис. 3.15. Температурна залежність параметра E_g для стекол $As_{45}Se_{55}$

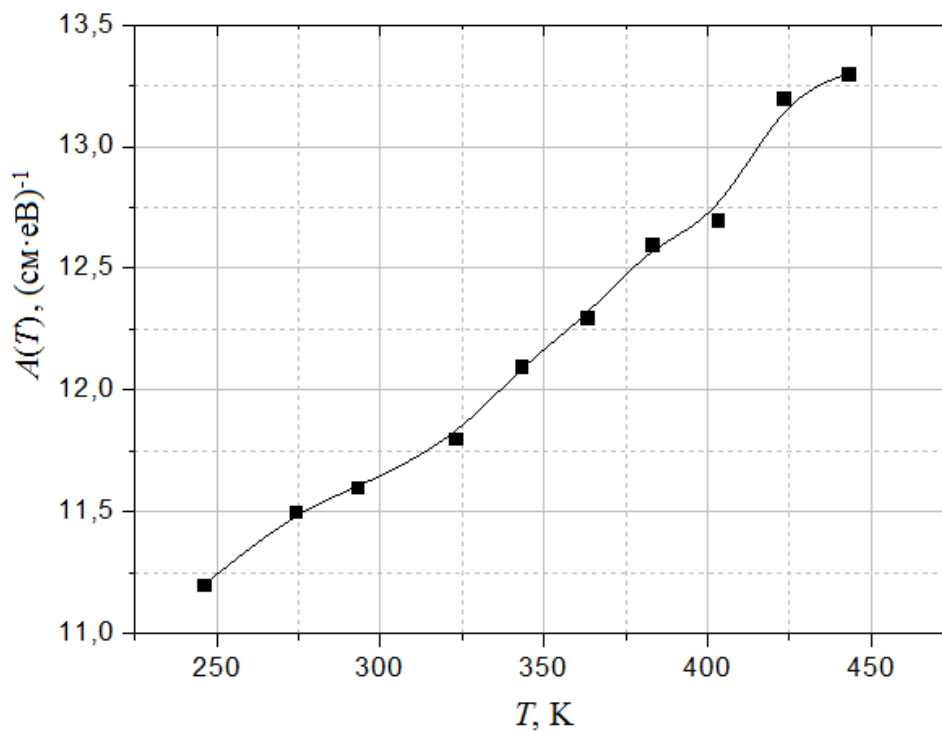


Рис. 3.16. Температурна залежність параметра A для стекол $As_{45}Se_{55}$

На рис. 3.14-3.16 наведені температурні залежності параметрів E_0 , E_g та A області Урбаха краю поглинання. Характеристична енергія E_0 показує деякий ріст із збільшенням температури. Аналогічна температурна поведінка спостерігалася нами та іншими авторами [53, 55] як нелегованих, так і для

легованих різними домішками кристалів GaAs. При цьому величина параметра E_0 для наших стекол у кілька разів більша, у порівнянні з вказаними кристалами.

Отримана нами температурна залежність $E_0(T)$ в діапазоні температур від 250 до 450 К добре описується лінійною функцією $E_0(T) = e_0 + e_a \cdot T$, що характерно для більшості халькогенідних стекол. У результаті математичної обробки експериментальних даних були отримані коефіцієнти e_0 та e_a , кількісні значення яких наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7.

Представлення параметрів області краю поглинання Урбаха стекол $As_{45}Se_{55}$ відповідними поліномами та похибки цього представлення

Параметр	Відносні похибки обробки
$E_0(T) = (0,065 + 5,05 \cdot 10^{-5} \cdot T)$ eB	2 %
$E_g(T) = (-9,89 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1,15 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,72)$ eB	7 %
$A(T) = (8,44 + 0,01 \cdot T)$ см ⁻¹	9 %

Величина оптичної ширини забороненої зони досліджених нами стекол при кімнатній температурі близька до 1,6 eB. Із збільшенням температури величина E_g закономірно зменшується (рис.3.15). При цьому усереднений коефіцієнт температурних змін приблизно складає $-5 \cdot 10^{-4}$ eB/К. Порівнюючи цю величину із відповідними параметрами, отриманими нами для кристалів GaAs, можна зробити висновок, що температурний коефіцієнт стекол $As_{45}Se_{55}$ майже удвічі більший.

Відповідно із графіком (рис.3.15) температурна залежність E_g добре описуються поліномом другого порядку, який близький до лінійного представлення. Такою ж функцією представлено ширину забороненої зони і легованих різними домішками кристалів GaAs [56 та 53]. Враховуючи наведені факти, ми представили $E_g(T)$ поліномом другого степеня, явний вид якого

записаний в таблиці 3.7. Представлення ж $E_g(T)$ лінійною функцією призводить до значно більших абсолютних похибок.

Відповідно із співвідношенням (3.7), параметр $A(T)$ визначає величину коефіцієнта оптичного поглинання при температурі T для енергії фотонів $h\nu = E_g(T)$. Його поведінку із зростанням температури ілюструє графік рис.3.16. Відповідно з ним, не дивлячись на досить значний розкид експериментальних точок, тут прослідковується лінійна залежність параметра A від температури. Явний вид отриманої нами лінійної функції наведено в таблиці 3.7.

Використовуючи всі отримані результати теоретичного аналізу експериментальних даних, ми можемо записати явний вигляд математичного співвідношення для коефіцієнта оптичного поглинання стекол $As_{45}Se_{55}$, які служать матеріалам для ЧЕ ВОДТ:

$$\alpha(h\nu, T) = (0,01 \cdot T + 8,44) \exp\left(\frac{h\nu + 9,89 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 1,15 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,72}{5,05 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,065}\right). \quad (3.13)$$

В отриманому виразі енергія фотонів має задаватися в еВ, температура - у Кельвінах, а коефіцієнт оптичного поглинання отримується в $см^{-1}$. Дане співвідношення дозволяє проводити достовірний теоретичний аналіз, моделювання та оптимізацію експлуатаційних параметрів ВОДТ на основі халькогенідних стекол $As_{45}Se_{55}$. Застосовуючи використаний нами підхід, можна готувати теоретичну базу розробки ВОТ на основі ЧЕ із різних як кристалічних, так і неупорядкованих сучасних оптичних матеріалів.

3.4 Вибір оптимального типу оптичної схеми волоконно-оптичних термометрів із напівпровідниковим чутливим елементом

Фізичні основи роботи ВОДТ із напівпровідниковими чутливими елементами базуються на вимірюванні зміни інтенсивності або фази світлових променів при проходженні їх крізь термочутливий елемент. При цьому величина таких змін має однозначно визначатися температурою чутливого елемента. Відповідно із проведеним вище аналізом, за принципом дії

найпростішими є ВОДТ, у яких інформаційний сигнал формується за рахунок зсуву краю спектру власного оптичного поглинання матеріалу чутливого елемента в довгохвильову сторону при підвищенні температури. Виникаючі спектральні зміни можна аналізувати та вимірювати, реєструючи одну із трьох величин [57]:

- оптичне пропускання на робочій фіксованій довжині хвилі;
- зсув краю оптичного поглинання на рівні фіксованого пропускання;
- температурна зміна ширини забороненої зони.

Найпростішими для технічної реалізації та найдешевшими при виробництві є ВОТ із реєстрацією в якості інформаційного сигналу величини оптичного пропускання на робочій довжині хвилі λ_0 . При цьому робоча довжина хвилі вибирається із спектральної області краю фундаментального поглинання ЧЕ. Наші спектральні дослідження показують, що якщо напівпровідниковий ЧЕ затиснути між приймальним та передавальним ОВ, то величина інтенсивності світлового променя із довжиною хвилі λ_0 , пропущеного через таку оптичну систему, є інформаційним сигналом, зміна якого прямо пов'язана із зміною температури ЧЕ. Отримані нами експериментальні результати показують, що саме такий тип ВОДТ є оптимальним для розробки ВОТ на основі напівпровідникових ЧЕ.

Таким чином, у вибраному для досліджень ВОДТ у процесі вимірювань здійснюється амплітудна модуляція інформаційного оптичного сигналу – модуляція інтенсивності вихідного оптичного випромінювання. Такий тип модуляції має кілька важливих переваг. Зокрема, він не вимагає використання джерел когерентного випромінювання на нього не накладаються високі вимоги до якості джерела і приймача випромінювання. Однак оптичний тракт ВОДТ з такою модуляцією повинен бути оптимізованим за стабільністю потужності випромінювання джерела та за чутливістю приймача оптичного сигналу. Крім того, важливими оптимізаційними параметрами є варіації величини відбивання на межах розділу елементів оптичного тракту, втрати за рахунок розсіювання випромінювання в цих елементах, зміни модового складу випромінювання в

ОВ. В окремих випадках для зменшення впливу на процес вимірювань цих фізичних явищ доцільно використовувати в оптичному тракті поляризоване випромінювання [58], що може ускладнити ВОТ.

У ВОДТ переважно використовують три базові схеми оптичного тракту [58]: схеми прохідного типу, відбиваючого типу та комбіновані. З метою вибору оптимального варіанту, ми проаналізували принципи роботи цих трьох схем та їх переваги і недоліки.

У оптичних схемах прохідного типу випромінювання пропускається крізь ЧЕ, вставлений у розрив ОВ. Найбільш розповсюдженим варіантом даної схеми є однопроменева одноканальна оптична схема (рис. 3.17). Вона містить джерело 1 та приймач 2 випромінювання, вхідне та вихідне одно або багатомодові ОВ 3 і ЧЕ елемент 4. При цьому всі складові елементи такого ВОДТ повинні бути оптично узгодженими. Дана схема є найпростішою в технічному виконанні, але має серйозний недолік – відсутність будь яких компенсаційних елементів, які мінімізують вплив оточуючого середовища і нестабільності потужності джерела та чутливості приймача випромінювання на точність вимірювання температури.

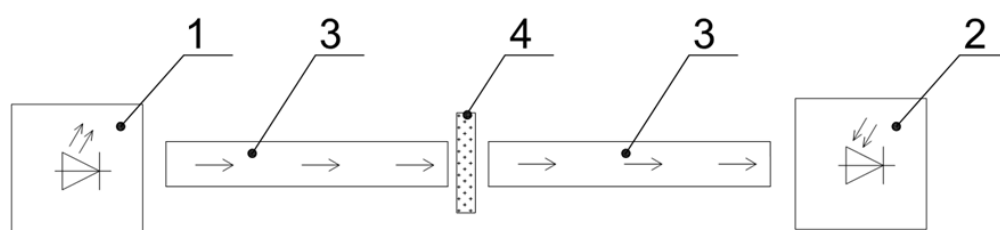


Рис. 3.17. Однопроменева одноканальна оптична схема ВОДТ прохідного типу

Зменшити вплив вказаного недоліку можна за допомогою використання двоканальних оптичних схем ВОДТ, один із варіантів якої наведено на рис. 3.18. У даній схемі застосовують два незалежні оптичні канали: опорний та робочий. Однак ці два канали працюють з одним джерелом випромінювання. У незначній мірі функціональні параметри даного типу схем можна покращити, вводячи

ідентичний ЧЕ і в опорний канал. Але отримані переваги повністю нівелюються ускладненням конструкції ВОТ та підвищенням їх вартості.

Головними недоліками наведеної двохканальної схеми є необхідність використання джерел випромінювання, із значно вищою потужністю оптичного випромінювання, яка має перевищувати 100 мВт та введення в конструкцію двох ОВ значної довжини. Сучасна оптична та електронна елементна база дозволяє без особливих труднощів вирішити ці проблеми. Тому основним проявом вказаних недоліків є лише значне подорожчання ВОТ.

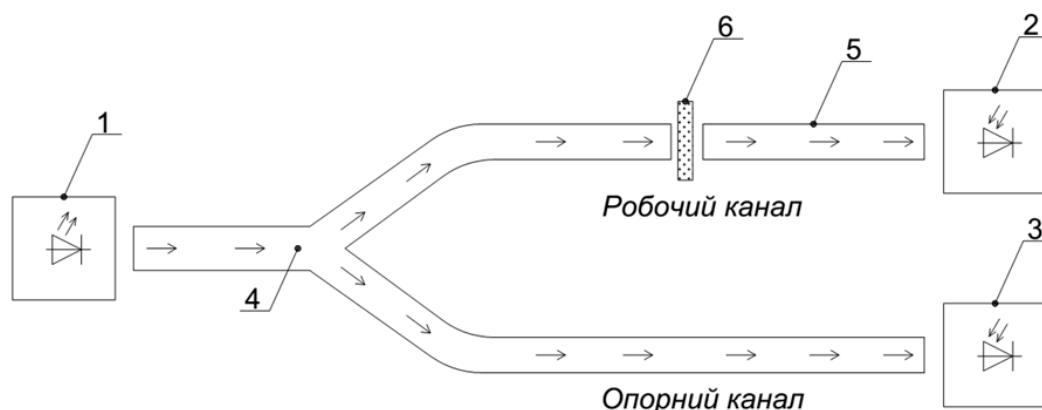


Рис. 3.18. Однопроменева двоканальна оптична схема ВОДТ: 1 - джерело випромінювання, 2 і 3 - приймачі випромінювання робочого та опорного каналів, 4 - волоконно-оптичний Y-подільник, 5 - ОВ, 6 – ЧЕ

У оптичних схемах ВОДТ відбиваючого типу (рис.3.19) випромінювання від джерела 1 поширюється по ОВ, потрапляє в ЧЕ 4, проходить через нього, відбивається від дзеркального покриття 5, знову проходить через ЧЕ і повертається у волокно. У Y-подільнику 3 частина випромінювання передається на приймач випромінювання 2, а інша частина "втрачається", потрапляючи в канал джерела випромінювання на зворотному шляху проходження променя. Головною перевагою даної оптичної схеми ВОДТ є компактність та простота конструкції тієї частини термометра, де розміщено ЧЕ. Однак схемам відбиваючого типу притаманні багато недоліків: необхідність застосовувати більш потужне джерело випромінювання, відсутність елементів компенсації

нестабільності роботи оптичних елементів, деградація властивостей ЧЕ з нанесеним дзеркальним покриттям за рахунок взаємної дифузії їхніх атомів.

Існує цілий ряд оптичних схем ВОДТ комбінованого типу, у яких поєднуються ті або інші елементи різних наведених схем. Однак це не дозволяє позбавитись основних фізико-технічних недоліків ВОТ аналогового типу. Але при цьому комбіновані схеми є значно складнішими як конструктивно, так і за технічним виконанням.

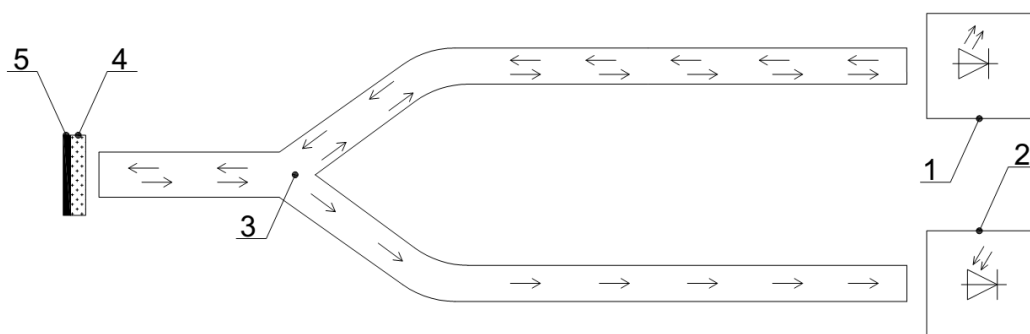


Рис. 3.19. Оптична схема ВОДТ відбиваючого типу

Таким чином, проведений нами аналіз дозволяє зробити висновок про те, що оптимальним поєднанням технічних, функціональних, конструкційних та економічних параметрів володіють ВОТ на основі однопроменевої двоканальної оптичної схеми прохідного типу з розміщенням ЧЕ в одному робочому каналі, тобто схеми рис.3.18.

3.5 Вибір елементів оптичного тракту для двоканальної оптичної схеми

Базовим елементом одноканальної оптичної схеми ВОДТ є джерело випромінювання. На нашу думку, у їх якості найдоцільніше застосовувати сучасні світлодіоди. Сьогодні на ринку світлодіодів для оптичних застосувань існує досить великий вибір як за технічними параметрами, так і за ціною. Про що свідчать дані таблиці 3.8.

Зокрема, для оптимальних ЧЕ із стекел As-Se досить хороші експлуатаційні параметри мають прилади фірми Laser Components M808D50-3-

1230 [59]. Їхня спектральна характеристика потужності випромінювання наведена на рис. 3.20. Як слідує із рисунка максимум спектрального розподілу потужності випромінювання лежить на довжині хвилі 0,808 мкм. Це вказує на хорошу відповідність максимуму випромінюваної потужності таких світлодіодів оптимальній робочій довжині хвилі ЧЕ із скла $As_{45}Se_{55}$.

Таблиця 3.8.

Параметри лазерних світлодіодів

Світлодіод	λ_{max} , нм	P_0 , мВ	$\Delta\lambda$, нм	Виробник
HL6512MG	658	50	20	Hitachi Laser Diode
ML101J27	660	120	10	Mitsubishi Laser Diode
HL6756MG	670	15	20	Hitachi Laser Diode
HL6750MG	685	50	8	Opnext Laser Diode
HL6738MG	690	30	10	Hitachi Laser Diode
M808D50	808	50	10	Laser Komp

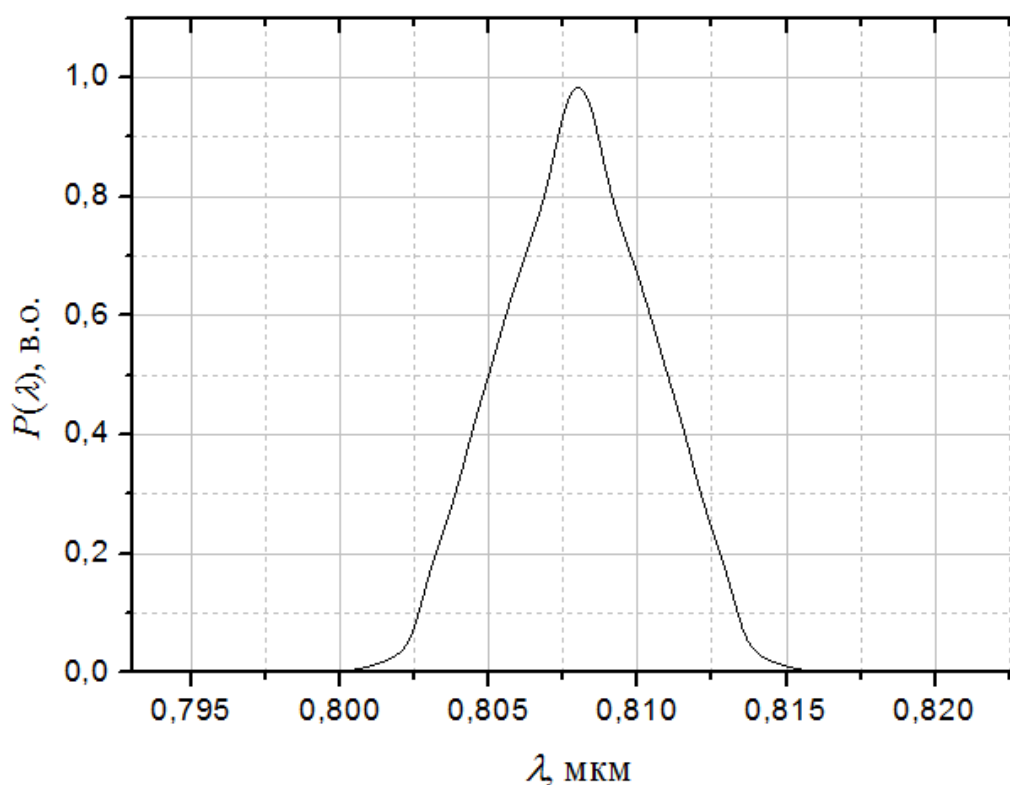


Рис. 3.20. Спектр потужності випромінювання лазерного діода M808D50-3-1230 [59]

Відмітимо також достатньо високі й інші технічні експлуатаційні параметри лазерного діода M808D50-3-1230:

- інтегральна потужність випромінювання при прямому струмі живлення 100мА є не меншою за 50 мВт;
- оптимальний робочий струм 100 мА;
- вхідний опір 4,0 Ом;
- діаметр вихідного пучка випромінювання рівний 0,25мм;
- діапазон робочих температур від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вище було обґрунтовано оптимальність використання в якості приймача випромінювання для ВОТ сучасних фотодіодів. Їхній діапазон чутливості значно ширший у порівнянні з випромінювальною здатністю відповідних світлодіодів. Тому при виборі фотодіода важливими є не стільки його спектральні характеристики, як його чутливість та стабільність параметрів. Дуже важливими є також конструктивні особливості фотодіода, які визначають надійність його стикування з ОВ та механічна стабільність тривалої роботи всього ВОДТ.

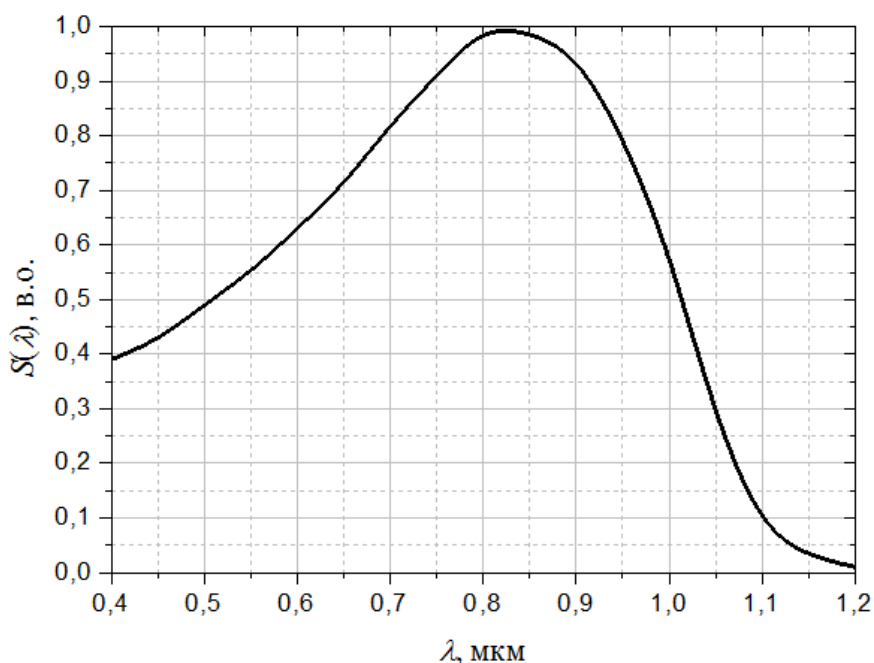


Рис. 3.21. Спектральна характеристика чутливості фотодіодів OPT101 [60]

Для оптимальних ЧЕ із скла $As_{45}Se_{55}$ хорошим вибором може бути прилад OPT101 (Texas Instruments). Його спектральна характеристика чутливості наведена на рис. 3.21. Вона вказує на відмінну узгодженість даного фотодіода із оптимальною робочою довжиною світлодіода та ЧЕ на основі скла $As_{45}Se_{55}$.

Для вибраних фотодіодів OPT101 характерні також високі струмова інтегральна чутливість $S_{in} \geq 0,55$ А/Вт та постійна часу при включенні або виключенні приладу не більше 5 нс. Важливими є й інші параметри цих фотодіодів:

- номінальна робоча напруга від 2,7 В до 36 В;
- розмір чутливого елемента 2,9 мм × 2,9 мм;
- кут зору не менше 36°.

Важливими для стабільної роботи ВОДТ є також параметри ОВ, які служать для передачі випромінювання від джерела до чутливого елемента та від чутливого елемента до приймача. Наші експерименти з різними типами ОВ показали, що оптимальним набором оптичних та конструкційних параметрів для ВОТ володіють багатомодові кварцові волокна FinMark PS001MM PVC [61]. Вони мають діаметр серцевини $d_c = 0,1$ мм та показник заломлення $n = 1,553$ (на довжині хвилі 0,81 мкм). Для цих волокон характерні дуже малі втрати потужності випромінювання (менші 3,0 дБ/км) та широкий температурний діапазон експлуатації від -60 °С до +170 °С, який відповідає температурному діапазону проведення вимірювань ВОДТ з ЧЕ зі скла $As_{45}Se_{55}$. У цілому вказані ОВ дозволяють будувати на їхній основі ВОТ із оптичним трактом довжиною до 1 км.

Висновки до розділу 3

1. Експериментально досліджено спектри пропускання легованих кристалів GaP і GaAs та ЧЕ на їх основі в температурному діапазоні від 240 К до 450 К. 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 забороненої зони рівний $6 \cdot 10^{-4} \text{ еВ/К}$; 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 $3,04 \cdot 10^{-3} \text{ (в.о.)/К}$ для $\lambda_0 = 585 \text{ нм}$ до $0,89 \cdot 10^{-3} \text{ (в.о.)/К}$ для $\lambda_0 = 600 \text{ нм}$;
- для GaAs область робочих довжин хвиль λ_0 ЧЕ від 950 нм до 1060 нм; температурна чутливість ЧЕ змінюється від $2,84 \cdot 10^{-3} \text{ (в.о.)/К}$ для $\lambda_0 = 990 \text{ нм}$ до $1,68 \cdot 10^{-3} \text{ (в.о.)/К}$ для $\lambda_0 = 1020 \text{ нм}$.

2. Експериментально досліджено спектри пропускання стекол 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 для ВОТ. Визначено оптимальне поєднання всіх експлуатаційних характеристик ЧЕ для ВОДТ із халькогенідних стекол $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$.

3. Для оптимального хімічного складу халькогенідного скла $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$ проведено комплекс досліджень і при цьому отримано: ширина оптичної забороненої зони змінюється від 1,62 еВ до 1,47 еВ; температурний коефіцієнт ширини забороненої зони рівний $5 \cdot 10^{-4} \text{ еВ/К}$; область робочих довжини хвиль λ_0 ЧЕ від 800 нм до 815 нм; температурна чутливість ЧЕ змінюється від $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ (в.о.)/К}$ для $\lambda_0 = 805 \text{ нм}$ до $1,82 \cdot 10^{-3} \text{ (в.о.)/К}$ для $\lambda_0 = 815 \text{ нм}$;

4. Визначено робочі температурні характеристики ЧЕ, які для різних матеріалів мають такі особливості:

- для GaP ці характеристики суттєво нелінійні для всіх можливих робочих хвиль ВОДТ;
- робота ЧЕ із GaAs у широкому діапазоні температур задається двома або трьома температурними характеристиками, кожна з яких придатна лише для своєї робочої хвилі випромінювання та для свого вузького інтервалу вимірювальних температур;
- для стекол оптимального складу $As_{45}Se_{55}$ температурні характеристики лінійні для всіх робочих хвиль ВОДТ в області температур від 320 К до 450 К і спостерігається незначне відхилення їх від лінійності в області температур, менших 320 К.

5. Вперше теоретично отримано математичне співвідношення для коефіцієнта оптичного поглинання стекол $As_{45}Se_{55}$ в такому вигляді як функцію температури та енергії фотонів для області робочих діапазонів змін цих параметрів. Дане співвідношення суттєво спрощує проведення теоретичного аналізу, моделювання та оптимізації експлуатаційних параметрів ВОДТ. Застосовуючи розроблений підхід, аналогічне співвідношення можна отримати й для інших напівпровідникових як кристалічних, так і склоподібних матеріалів, придатних до використання в якості ЧЕ ВОДТ.

6. Показано, що для амплітудних ЧЕ оптимальним поєднанням технічних, функціональних, конструкційних та економічних параметрів володіють ВОТ на основі однопроменевої двоканальної оптичної схеми прохідного типу з розміщенням ЧЕ в одному робочому каналі. Для такої схеми підібрано всі компоненти оптичного тракту ВОДТ із робочою довжиною хвилі $\lambda_0 = 808$ нм.

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ І РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОМЕТРА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

4.1 Розрахунок потужності випромінювання на вікнах фотодіодів

Відповідно із правилами проведення теоретичних розрахунків оптико-електронних систем, аналіз параметрів ВОДТ розпочнемо із кінцевого елемента, на якому формується електричний сигнал для послідууючої обробки, а саме із фотодіода. На його виході величина електричного сигналу знаходиться у прямій залежності від величини того світлового потоку, який потрапляє на його вікно. У свою чергу, падаючий на фотодіод світловий потік визначатиметься світловою енергією, яку направляє в оптичний тракт джерело випромінювання та втратами самого оптичного каналу. Прийемо, що під час вимірювань сумарна потужність випромінювання на виході світлодіода рівна P_d .

Оскільки діаметр випромінюючої площадки вибраного нами світлодіода (0,25 мм) перевищує діаметр серцевини ОВ (0,1 мм), то при їх безпосередньому з'єднанні між собою в оптичний канал ВОДТ буде вводиться невелика частина потужності світлової енергії світлодіода, яку позначимо через P . Враховуючи те, що розподіл інтенсивності випромінювання світлодіода в середині його тілесного кута близький до рівномірного, то співвідношення величин введених потужностей задається простим виразом:

$$P = P_d \cdot S_e/S_o, \quad (4.1)$$

де S_e , S_o - відповідно площі серцевини ОВ і випромінюючої площадки світлодіода. Розрахунки дають, що $P \approx 0,15 \cdot P_d$.

З метою збільшення величини введеного світлового потоку в ОВ нами був сконструйований спеціальний оптичний конектор рис. 4.1 на основі стандартних фоконів. Це дозволило збільшувати ефективність вводу потужності світла в оптичне волокно в k разів, де k називають коефіцієнтом

ефективності фокона. Діаграма напрямленості оптичних променів у конекторі приведена на рис. 4.2. Оптичні вимірювання з використанням експериментальної установки для дослідження експлуатаційних характеристик ВОДТ, що описана у розділі 2, показали, що для нашої конструкції оптичного конектора $k \approx 3,9$. У результаті в ОВ ВОДТ від світлодіода вводиться значно вища потужність оптичного випромінювання, яка досягала величини $P \approx 0,6 \cdot P_d$. Це дозволяє побудувати, на основі розроблених ВОДТ, прилади із протяжними до кількох кілометрів лініями оптичного зв'язку між джерелом та приймачем випромінювання.

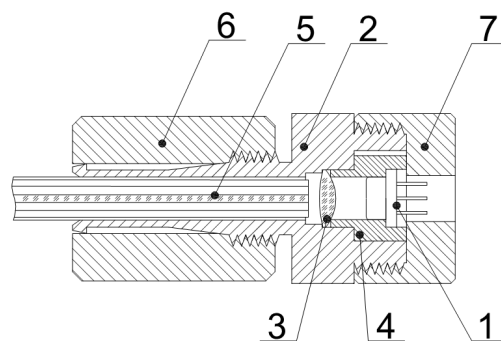


Рис. 4.1. Схема конструкції конектора джерела випромінювання з волокном: 1 - джерело випромінювання; 2 - основа; 3 - лінза; 4 - тримач; 5 - оптичне волокно; 6 - гайка затискача; 7 - гайка фіксатор

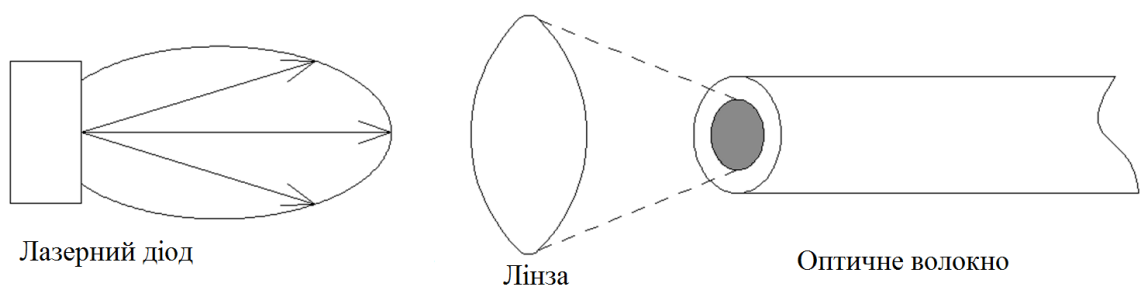


Рис. 4.2. Діаграма напрямленості оптичних променів у конекторі

При розповсюдженні випромінювання по оптичному тракту ВОДТ проходить його ослаблення за рахунок різних фізичних явищ. Зокрема, при проходженні кожної межі розділу двох оптично різних середовищ проходить ослаблення світлового променя, обумовлене Френелівським відбиванням. Для

оптичного тракту нашого ВОДТ характерне близьке до нормального падіння випромінювання на кожній границі двох оптичних елементів. Оскільки при з'єднанні таких елементів ми не застосовували спеціальних узгоджувачів оптичних середовищ, то між контактуючими елементами кожної границі існує тонкий проміжок повітря. Крім того слід врахувати, що граничним матеріалом всіх контактуючих із повітрям елементів є прозоре в ближній ІЧ спектральній області кварцове скло із приблизно однаковим у робочій області спектру ВОДТ показником заломлення $n_q \approx 1,46$. У результаті, вважаючи всі контактуючі матеріали ізотропними середовищами, для близького до нормального проходження променів величину пропускання випромінювання на кожній границі розділу двох оптичних елементів ВОДТ (крім поверхонь ЧЕ) можемо знаходити за формулою Френеля:

$$\tau_i = 1 - r_i \approx 1 - \left| \frac{n_q - 1}{n_q + 1} \right|^2 \approx 0,96. \quad (4.2)$$

На шляху поширення випромінювання від світлодіода до фотодіода наявні кілька границь контактування різних оптичних елементів. Для вибраної нами оптимальної оптичної схеми ВОТ на рис. 4.3 ці границі позначені літерами a, b, c, d для робочого каналу і літерою f для опорного каналу.

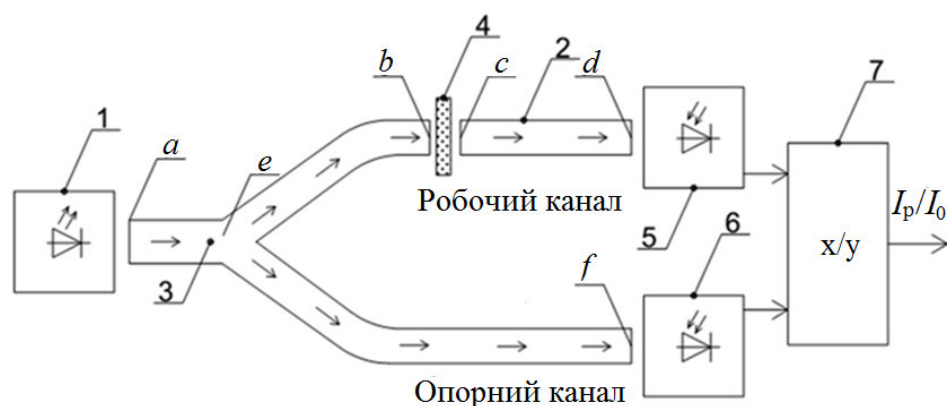


Рис. 4.3. Комбінована структурна схема волоконно-оптичного датчика температури

Будемо також вважати, що в точці e Y-розгалужувач ділить інтенсивність випромінювання відповідно з коефіцієнтом поділу y . Тоді для

робочого каналу $\tau_e = y$, а для опорного $\tau_e = 1 - y$. Одночасно врахуємо, що середній коефіцієнт сумарних оптичних втрат у сучасних оптичних розгалужувачах відповідає величинам біля 0,5 дБ [62]. Для такого випадку умовний коефіцієнт передачі (пропускання) Y -розгалужувача розрахуємо як:

$$\tau_e = \frac{I_{out}}{I_{in}} \approx 10^{-0,05} = 0,89 \text{ в.о.} \quad (4.3)$$

Слід також врахувати втрати потужності в ОВ, які створюють робочий та опорний канали. Для цього приймемо, що довжини ОВ обох каналів є однаковими і рівними L , а погонний коефіцієнт втрат волокна візьмемо рівним 0,5 дБ/км. Тоді коефіцієнт пропускання випромінювання в оптичному волокні:

$$\tau_v = \frac{I_{out}}{I_{in}} \approx 10^{-0,05 \cdot L}. \quad (4.4)$$

Результуючий коефіцієнт пропускання оптичних трактів обох каналів буде визначатися як добуток коефіцієнтів пропускання кожної границі розділу контактуючих елементів, коефіцієнта пропускання ОВ та пропускання ЧЕ τ в робочому каналі. Таким чином пропускання робочого каналу:

$$\tau_0 = \tau_v \cdot \tau_a \cdot \tau_e \cdot y \cdot \tau_b \cdot \tau_c \cdot \tau \cdot \tau_d. \quad (4.5)$$

Аналогічно пропускання опорного каналу:

$$\tau_p = \tau_v \cdot \tau_a \cdot \tau_e \cdot (1 - y) \cdot \tau_f. \quad (4.6)$$

При цьому слід зазначити, що в наведених співвідношеннях $\tau_d \approx \tau_f$.

У загальному випадку всі співмножники співвідношень (4.5) та (4.6) є функціями температури та робочої довжини хвилі випромінювання. Однак, для оптичної схеми ВОТ на рис. 4.3 границі a , d , e та f знаходяться при однакових температурних та кліматичних умовах, а саме - в умовах того зовнішнього середовища, у якому розміщений електронний блок приладу. Тому вплив температури, робочої довжини хвилі випромінювання та інших експлуатаційних умов буде реально відчуватися в параметрах ВОТ лише за рахунок впливу всіх цих умов на границі b і c , на сам ЧЕ та на ОВ робочого й опорного каналу. Детальний аналіз такого впливу проводиться в наступних підрозділах роботи.

Для випадку ізотермічних умов розміщення всіх елементів ВОТ при 300 К ми провели розрахунки співвідношення пропускань робочого й опорного каналу при 300 К (умовно це відповідає режиму роботи термометра при кімнатній температурі). Для цього були прийняті такі вихідні величини: коефіцієнт поділу ідеального Y-розгалужувача $y = 0,5$ довжина ОВ $L = 1$ км, робоча довжина хвилі 0,800 мкм. Результати таких розрахунків проведених за співвідношеннями (4.2), (4.3) та (4.4) для конкретної конструкції ВОТ із чутливим елементом зі скла $As_{45}Se_{55}$ наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Розраховані величини оптичного пропускання різних конструктивних елементів ВОТ при температурі 300 К

Параметр, від. од.	τ_a, τ_d, τ_f	τ_v	τ_e	y	τ_b, τ_c	τ
Значення	0,92	0,89	0,89	0,50	0,96	0,33

Враховуючи наведені в таблиці 4.1 результати, отримаємо для каналів ВОТ з кілометровою довжиною ОВ значення величин $\tau_0 = 0,098$ і $\tau_p = 0,34$. Тоді для оптичного тракту із джерелом випромінювання у вигляді світлодіода M808D50-3-1230 орієнтовні потужності світлових потоків, які можуть попадати на фотодіоди опорного і робочого каналів будуть відповідно дорівнювати:

$$P_0 = P_{LED} \cdot \tau_0 = 32 \cdot 10^{-3} \cdot 0,098 = 3,1 \text{ мВт},$$

$$P_p = P_{LED} \cdot \tau_p = 32 \cdot 10^{-3} \cdot 0,34 = 10,9 \text{ мВт}.$$

Одержані величини відповідають одному із граничних режимів роботи ВОТ, коли оптичне пропускання ЧЕ є максимальним і рівним 0,33 в.о. Для іншого граничного режиму з мінімальним пропускання ЧЕ 0,06 в.о. (цей режим відповідає температурі біля 450 К) величини $\tau_0 = 0,02$ і $\tau_p = 0,34$ а величини $P_0 = 0,64$ мВт і $P_p = 10,9$ мВт.

Аналізуючи отримані дані можна бачити, що приймаючі фотодіоди опорного й робочого каналів працюють у досить нееквівалентних умовах у всьому діапазоні вимірювальних температур. Для оптимізації режимів

функціонування фотодіодів доцільно підбирати таку конструкцію Y - розгалужувачів, для якої коефіцієнт поділу був би більшим і з величиною u біля 0,8. Тоді прості розрахунки показують, що $P_p = 4,4$ мВт, а P_0 змінюється приблизно в діапазоні від 1 мВт до 5 мВт. Із отриманих даних можна оцінити параметри того середнього режиму роботи фотодіодів, в околі якого вони оптимально функціонуватимуть у складі ВОТ.

Ще одним видом втрат потужності випромінювання в оптичному тракті є релєївське розсіювання в матеріалах його оптичних елементів. Воно зумовлюється неоднорідностями структури різної природи цих матеріалів. У нашому випадку такими елементами є ОВ та ЧЕ.

Для ЧЕ внаслідок дуже малої його товщини релєївським розсіюванням випромінювання можна знехтувати. Оскільки довжини ОВ у робочому і опорному каналі практично рівні, а самі волокна беруться із одного і того ж комерційного зразка, то можна вважати релєївське розсіювання в них однаковим і як таке, яке враховане нами в їхньому інтегральному коефіцієнті питомих втрат раніше. У результаті при розрахунках параметрів ВОТ релєївське розсіювання в його елементах окремо можна не враховувати.

Границі розділу елементів ВОДТ b та c перебувають у зоні вимірюваної температури. Коефіцієнти відбивання оптичного випромінювання на цих границях може залежати від температури. Зрозуміло, що такі зміни можуть впливати на сигнал фотодіода робочого каналу термометра і слід оцінити величину такого впливу. Границі розділу b та c складаються з двох меж розділу оптичних матеріалів: ОВ - повітря та повітря - ЧЕ. Другу, із вказаних, межу ми відносимо безпосередньо до самого ЧЕ і її вплив на оптичний сигнал аналізуватиметься в наступних підрозділах роботи разом із іншими параметрами ЧЕ. Щодо температурних змін коефіцієнта відбивання межі ОВ - повітря, то вони визначаються температурним коефіцієнтом показника заломлення кварцового скла серцевини ОВ dn_q/dT .

Для аналізу врахуємо, що для характерного для нашого ВОДТ нормального падіння оптичного випромінювання на межу поділу двох середовищ згідно із формулою Френеля (4.2) коефіцієнт відбивання:

$$r \approx \left| \frac{n_q - 1}{n_q + 1} \right|^2 \quad (4.7)$$

У такому випадку:

$$\frac{dr}{dT} = 2 \cdot \left| \frac{n_q - 1}{n_q + 1} \right| \cdot \frac{(n_q + 1 - n_q + 1)}{(n_q + 1)^2} \cdot \frac{dn_q}{dT} = 4 \frac{n_q - 1}{(n_q + 1)^3} \cdot \frac{dn_q}{dT} \quad (4.8)$$

Відповідно до даних [63] температурний коефіцієнт показника заломлення кварцових стекол dn_q/dT не перевищує 10^{-4} K^{-1} . Взявши до уваги цю величину, розрахуємо інтенсивність температурних змін коефіцієнта відбивання:

$$\frac{dr}{dT} \approx 4 \frac{0,46}{(2,46)^3} \cdot 10^{-4} \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1} \quad (4.9)$$

Тоді в робочому діапазоні температур ВОДТ біля 300 К максимальна зміна коефіцієнта відбивання на межі ОВ не перевищуватиме 0,2 %. Така величина на два порядки менша всіх інших оптичних параметрів оптичного робочого каналу ВОТ (таблиця 4.1) і відповідно буде вносити несуттєву відносну та абсолютну похибки у результати вимірювань температури.

Відмітимо також, що для монохроматичних джерел випромінювання ВОТ притаманна деяка спектральна нестабільність, яка теж зумовлює похибки вимірювання температури даними приладами. Вплив спектральної нестабільності на величину коефіцієнта відбивання границь ОВ зумовлений дисперсією показника заломлення кварцового скла $dn_q/d\lambda$, який приблизно рівний $0,015 \text{ мкм}^{-1}$ [64]. Тоді спектральні зміни коефіцієнта відбивання на межі ОВ будуть визначатися аналогічним до (4.9) співвідношення і з врахуванням $n = 1,46$ дорівнюватимуть:

$$\frac{dr}{d\lambda} \approx 4 \frac{0,46}{(2,46)^3} \cdot \frac{dr}{dT} = 0,12 \cdot 0,015 \approx 0,002 \text{ мкм}^{-1} \quad (4.10)$$

Нестабільність довжини хвилі випромінювання сучасних світлодіодів лежить на рівні 0,3 нм/К [62]. Тоді наведені вище результати розрахунків показують, що вплив такої нестабільності на коефіцієнт відбивання всіх границь елементів оптичного тракту ВОТ не перевищує соті долі відсотка і відповідно практично не відчуватиметься у величинах оптичного пропускання опорного та робочого каналів ВОТ.

4.2 Розрахунок величини вихідного електричного сигналу фотодіодів

Як уже відмічалось, на кінцях робочого та опорного оптичних каналів ВОТ в якості первинних вимірювальних перетворювачів потужності випромінювання в електричний сигнал застосовані фотодіоди. Величина електричного сигналу фотодіода залежить не лише від величини потоку потужності падаючого на його вікно випромінювання, але і від чутливості фотодіода в абсолютних одиницях. При цьому слід враховувати досить сильну залежність чутливості фотодіодів від довжини хвилі падаючого на них випромінювання. Дану залежність враховують за допомогою функції спектрального розподілу чутливості $S(\lambda)$. Для використаних нами фотодіодів ОРТ101 дана характеристика наведена на рис. 3.21 у відносних одиницях. Це обумовлено тим, що фірми виробники фотодіодів приводять дані спектральні розподіли саме у відносних одиницях.

Така ж ситуація характерна і для джерел випромінювання у вигляді світлодіодів, для яких введемо функції $P(\lambda)$ спектрального розподілу потужності випромінювання також у відносних одиницях.

Таким чином, для реальних розрахунків параметрів ВОДТ довідникові спектральні розподіли виробників необхідно переводити в абсолютні значення спектральної функції розподілу випромінювання світлодіодів $P(\lambda)$ та спектральної функції чутливості фотодіодів $S(\lambda)$.

Одним із методів встановлення зв'язку між введеними вище спектральними характеристиками у відносних (надалі позначення із штрихами)

та абсолютних (надалі позначення без штрихів) одиницях полягає у використанні наступних простих співвідношень [65]:

$$S(\lambda) = S'(\lambda) \cdot S(\lambda_{\max}), \quad (4.11)$$

$$P(\lambda) = P'(\lambda) \cdot P(\lambda_{\max}), \quad (4.12)$$

де $S(\lambda_{\max})$ - чутливість фотодіода в абсолютних одиницях в максимумі спектральної характеристики при довжині хвилі випромінювання λ_{\max} ;

$P(\lambda_{\max})$ - значення випромінювальної потужності світлодіода в абсолютних одиницях в максимумі спектральної характеристики.

Однак, дуже часто фірми виробники оптоелектронних приладів у довідниках та в документації також не приводять і величини $S(\lambda_{\max})$ та $P(\lambda_{\max})$. Тому більш доступним методом встановлення зв'язку між різними одиницями вимірювань спектральних характеристик є використання кількісних абсолютних значень інтегральної чутливості S_{int} фотодіодів та інтегральної випромінювальної здатності світлодіодів P_{int} [65]. Відповідно із визначенням ці два параметри розраховуються шляхом інтегрування абсолютних спектральних характеристик приймача або джерела випромінювання. Тоді за визначення можемо записати:

$$S_{\text{int}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (4.13)$$

$$P_{\text{int}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (4.14)$$

де λ_1 та λ_2 – нижня та верхня границі реального спектрального діапазону відповідних елементів оптичного тракту ВОТ.

Тепер можна застосувати співвідношення (4.11) та (4.12) і отримати:

$$S_{\text{int}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S'(\lambda) \cdot S(\lambda_{\max}) \cdot d\lambda = S(\lambda_{\max}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S'(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (4.15)$$

$$P_{\text{int}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P'(\lambda) \cdot P(\lambda_{\max}) \cdot d\lambda = P(\lambda_{\max}) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P'(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (4.16)$$

Інтеграли, які входять в останні співвідношення легко розраховуються із наявних у довідниках спектральних характеристик. Відповідно, можна визначити і коефіцієнти переводу спектральних функцій з відносних одиниць вимірювань в абсолютні:

$$S(\lambda_{\max}) = \frac{S_{\text{int}}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S'(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (4.17)$$

$$P(\lambda_{\max}) = \frac{P_{\text{int}}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P'(\lambda) \cdot d\lambda}. \quad (4.18)$$

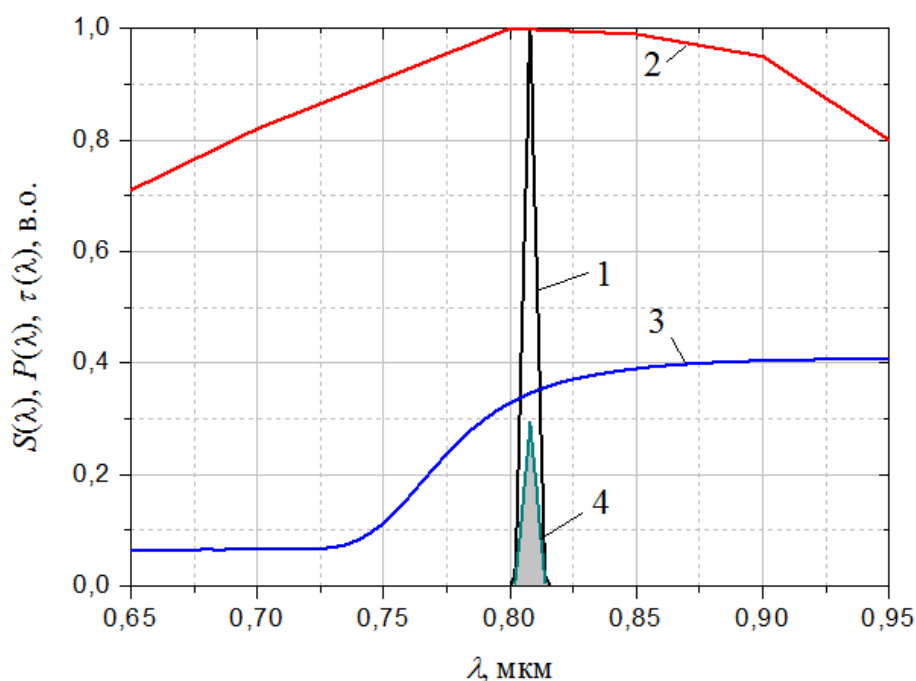


Рис. 4.4. Спектральні залежності параметрів елементів ВОТ у відносних одиницях (1 – світлодіод М808D50-3-1230; 2 – фотодіод ОРТ101; 3-термочутливий елемент із скла $As_{45}Se_{55}$) та спектральний розподіл результуючого потоку потужності випромінювання на фотодіоді (4) при кімнатній температурі

Застосуємо спектральні характеристики використаних нами світлодіода та фотодіодів у відносних одиницях, які наведені в попередньому підрозділі роботи. Отримані нами залежності наведені на рис. 4.4 сумісно із спектром пропускання ЧЕ на основі скла $As_{45}Se_{55}$.

Із проведеного аналізу слідує, що при заданих конкретних умовах роботи ВОТ робочий струм фотодіода I_ϕ відповідного каналу буде визначатися спектральною густиною потужності випромінювання світлодіода $P(\lambda)$, сумарним оптичним пропусканням даного каналу τ_0 (або τ_p), спектральною залежністю пропускання чутливого елемента $\tau(\lambda)$ та функцією спектрального розподілу чутливості фотодіода $S(\lambda)$. Врахування вкладу кожного з цих параметрів дозволяє записати інтеграли для розрахунку робочих струмів фотодіодів робочого і опорного каналів ВОДТ:

$$I_0 = \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (4.19)$$

$$I_p = \tau_p \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \cdot P(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (4.20)$$

Таким чином, нами отримані інтегральні співвідношення для визначення струмів фотодіодів в обох каналах ВОДТ, при різних умовах його роботи. Розрахунки інтегралів нами проводилися 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. Для прикладу наведемо результати таких розрахунків на основі спектральних характеристик базових елементів оптичного тракту ВОТ із ЧЕ зі скла $As_{45}Se_{55}$ (рис. 4.15 крива 1). Для вказаного прикладу конструкції та режиму роботи ВОТ при кімнатній температурі струм фотодіода опорного каналу рівний 6,7 мА, а струм робочого каналу – 1,28 мА. У цілому ж розрахунки за наведеною методикою дозволяють легко моделювати температурні залежності вихідних сигналів фотодіодів робочого та опорного каналів різноманітних ВОДТ. Подібні розрахунки також проводилися нами для термочутливих елементів на основі напівпровідникових кристалів GaAs [66, 67] та показали суттєву нелінійність передавальної характеристики ВОДТ на їх основі. Передавальна характеристика ВОДТ з чутливими елементами на основі плівок As-Se, що

досліджувалася нами у роботі [68] також демонструє нелінійну залежність передавальної характеристики.

4.3 Аналіз впливу флуктуацій густини та товщини чутливого елемента на параметри термометрів

ЧЕ досліджуваних ВОТ по суті представляє собою однорідне чутливе середовище певної густини із просторовим розподілом теплового поля, яке перетворює його в зміну оптичного пропускання цього середовища [69]. Для таких перетворювачів характерні шуми, обумовлені середньою квадратичною флуктуацією температури та густини матеріалу. Останні, в першу чергу, обумовлюються пористістю матеріалу, його наноструктурою та просторовою неоднорідністю товщини пластинки ЧЕ [70, 71] і є домінуючими за впливом на експлуатаційні властивості ВОТ. Зокрема, вони задають порогові значення параметрів вимірювання температури такими ВОТ. Без сумніву, для ЧЕ виготовлених описаним вище способом пресування певні неоднорідності товщини по площі пластинки будуть переважно виникати за рахунок наявності мікропор та неоднорідності поверхонь. Крім того, для халькогенідних стекол характерна певна пористість, ступінь якої визначається технологічними умовами виготовлення ЧЕ. Вплив таких неоднорідностей на пропускання ЧЕ найпростіше промоделювати інтегральною величиною усередненої по площі зміни його товщини Δd . Проведемо оцінку ступеня впливу даного параметра неоднорідностей на основні експлуатаційні параметри ВОТ.

Невелика зміна пропускання ЧЕ у ВОТ досягається при зміні його температури на ΔT при сталій його товщині. З іншого боку таку ж зміну пропускання можна одержати зміною його товщини на певну величину Δd . Тому очевидно, що для кожного ЧЕ наявні неоднорідності товщини, обумовлені технологією його виготовлення, будуть аналогічними деякій зміні його температури. Відповідно, зміни пропускання ЧЕ, обумовлені зміною температури, будуть накладатися на зміну пропускання, обумовлену змінами товщини цього ж ЧЕ.

Зрозуміло, що для конкретного ЧЕ зміни його товщини та пористості удуть дуже малими при варіації температури в робочому діапазоні ВОД (240К – 450К). Однак, при заміні у ВОДТ одного ЧЕ на інший ці зміни, можуть бути досить значними. Відповідно, будуть значними і зміни параметрів ВОТ у такій ситуації. Розрахуємо величину таких змін.

Залежність пропускання ЧЕ задається законом Бугера-Ламберта (з точністю до деякого безрозмірного коефіцієнту, який враховує всі незалежні від температури втрати в оптичному тракті) з врахуванням відбивання на двох поверхнях ЧЕ:

$$\tau = (1 - r)^2 \exp(-\alpha \cdot d) \quad (4.21)$$

Знайдемо із даного співвідношення абсолютну зміну пропускання ЧЕ $\Delta\tau$ при варіації їх товщини на абсолютну величину Δd , врахувавши незалежність від товщини всіх інших фізичних величин в (4.1):

$$\Delta\tau = -(1 - r)^2 \exp(-\alpha \cdot d) \cdot \alpha \cdot \Delta d \quad (4.22)$$

Введемо в розгляд відносну зміну товщин ЧЕ:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} \quad (4.23)$$

Тоді зміна пропускання ЧЕ за рахунок варіації їх товщини на величину Δd при певній температурі буде дорівнювати:

$$\Delta\tau = -\tau \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot d \quad (4.24)$$

З отриманих даних слідує, що зміни пропускання ЧЕ за рахунок варіацій їх товщини прямо пропорційні абсолютній зміні цієї товщини $\Delta d = \varepsilon \cdot d$ і крім того є досить складною функцією від температури. Остання проявляється через вплив на коефіцієнт поглинання матеріалу та на величину пропускання ЧЕ. Таким чином, зміни товщини ЧЕ d є важливим параметром, який наряду із іншими фізичними властивостями впливатиме на точність вимірювання температури та на порогову чутливість ВОТ у різних умовах експлуатації. Для аналізу такого впливу ми розраховали залежності $\Delta\tau$ від ε для різних комбінацій інших параметрів ВОДТ у граничних та середніх температурних

умовах. Результати таких розрахунків для ЧЕ з середньою товщиною 0,6 мм зі скла $As_{45}Se_{55}$ наведені на рис. 4.5 для робочої довжини хвилі 0,8 мкм.

Отримані залежності показують, що із ростом температури посилюється вплив нерівномірностей товщини ЧЕ на його пропускання. Відповідно при верхній межі температурного діапазону ЧЕ із скла $As_{45}Se_{55}$ такі зміни доходять до 1,5 % при досить великих відносних величинах $\varepsilon = 10 \%$. Якщо врахувати, що величина пропускання ЧЕ для верхньої межі вимірювальних температур рівна десь до 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 ЧЕ потужність випромінювання на фотодіоді може змінюватись на 20 %. Таким чином, зміни інтегральної товщини ЧЕ 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 ЧЕ, який встановлюється у ВОДТ та періодичного тестування ЧЕ в умовах їх безпосередньої експлуатації.

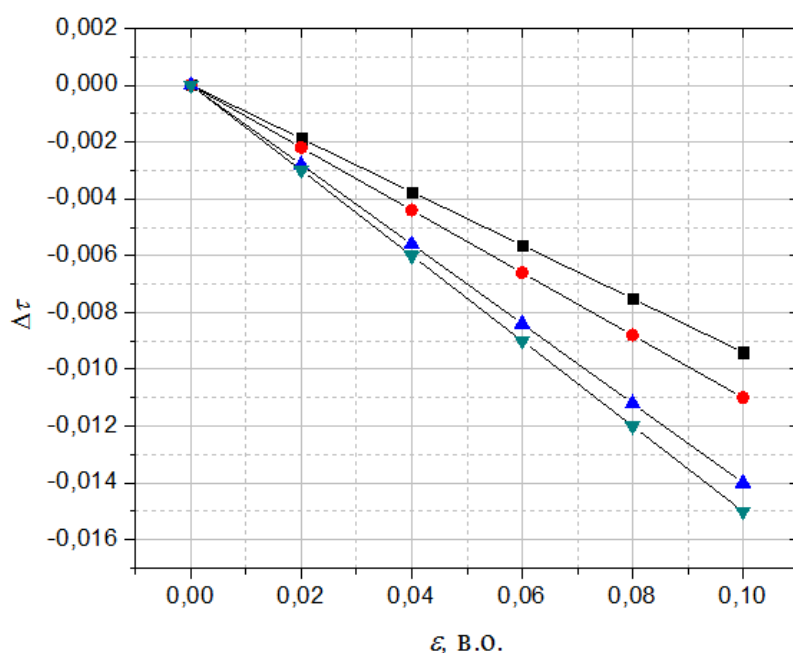


Рис. 4.5. Залежність змін пропускання ЧЕ від відносних змін їх товщини ε

4.4 Аналіз чутливості ВОДТ

Особливо важливим параметром ВОТ є чутливість його ЧЕ χ [70]. Зрозуміло, що вона буде визначатися в першу чергу чутливістю матеріалу ЧЕ. Однак на неї впливатиме і конструкція ЧЕ. Тому визначимо чутливість як відношення величини зміни пропускання зразка матеріалу певної товщини при зміні його температури на один К на заданій робочій довжині хвилі випромінювання [72]. Зрозуміло, що чутливість також буде представлятися функцією двох змінних: температури та енергії фотонів. Крім того, у величину чутливості матеріалу ЧЕ буде входити й товщина тих зразків, на яких проводиться вимірювання пропускання, оскільки параметр товщини входить в експоненту коефіцієнта пропускання зразків ЧЕ. Тому цей параметр слід враховувати при математичному аналізі чутливості. Таким чином

$$\chi(h\nu, T) = \frac{d\tau(h\nu, T)}{dT}. \quad (4.25)$$

Для аналізу величини введеного параметра слід провести диференціювання виразу для оптичного пропускання конкретного ЧЕ (4.25) по температурі. У результаті одержимо:

$$\begin{aligned} \frac{d\tau}{dT} &= -2(1-r) \frac{dr}{dT} \cdot \exp(-\alpha d) - (1-r)^2 \cdot \exp(-\alpha d) \cdot \left(d \cdot \frac{d\alpha}{dT} + \alpha \cdot \frac{dd}{dT} \right) = \\ &= -(1-r)^2 \cdot \exp(-\alpha d) \cdot \left(\frac{2}{1-r} \cdot \frac{dr}{dT} + d \cdot \frac{d\alpha}{dT} + \alpha \cdot \frac{dd}{dT} \right) = -\tau \cdot \left(\frac{2}{1-r} \cdot \frac{dr}{dT} + d \cdot \frac{d\alpha}{dT} + \alpha \cdot \frac{dd}{dT} \right) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Із отриманого співвідношення слідує, що чутливість ВОДТ визначається цілим рядом факторів. Проаналізуємо вплив кожного із них окремо.

Вираз для змін пропускання (4.26) містить як співмножники член з коефіцієнтом відбивання випромінювання від поверхонь ЧЕ $(1 - r)$, та його похідну по температурі dr/dT . Коефіцієнти відбивання r від двох поверхонь ЧЕ задаються показником заломлення його матеріалу - у нашому конкретному випадку халькогенідного скла $As_{45}Se_{55}$. Поверхні ЧЕ контактують із повітрям, показник заломлення якого приймають рівним одиниці, оскільки відносно

повітря міряються показники заломлення матеріалів. Наші експериментальні вимірювання показника заломлення скла $As_{45}Se_{55}$ в області його краю поглинання для довжин робочої хвилі біля 0,810 мкм дали величину $n \approx 3,1$. Відносна похибка таких вимірів була біля 10 %, однак, як показали розрахунки, вона у незначній мірі впливає на значення різних фізичних параметрів, які аналізуються при дослідженні ВОДТ. Крім того, відповідно із результатами роботи [73], показник заломлення скла $As_{40}Se_{60}$ на цій же довжині хвилі дорівнює 3,08. Враховуючи також дані [74], які показують близькість оптичних параметрів стекол обох відмічених складів, для послідуячого аналізу можна з достатньою для технічних розрахунків точністю прийняти на робочих довжинах в околі 0,8 мкм $n \approx 3,1$. Тоді, використовуючи для нормального падіння співвідношення (4.2) можна знайти:

$$1 - r = 1 - \left| \frac{n-1}{n+1} \right|^2 \approx 0,74. \quad (4.27)$$

Тоді, відповідно із співвідношенням (4.27) ми отримаємо:

$$\frac{dr}{dT} = 0,12 \cdot \frac{dn}{dT} \quad (4.28)$$

Ми не знайшли величину температурного коефіцієнта показника заломлення dn/dT стекол $As_{45}Se_{55}$. Але в роботах [75, 79] наводяться дані для температурних коефіцієнтів показника заломлення ряду інших халькогенідних матеріалів. Відповідно з ними, для стекол в околі складу $As_{40}Se_{60}$ $dn/dT \approx 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Можна наближено прийняти, що й для скла $As_{45}Se_{55}$ величина dn/dT досить близька до наведеного вище значення. Тоді температурні зміни коефіцієнта відбивання ЧЕ будуть $dr/dT \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Величину коефіцієнта лінійного розширення ЧЕ $\frac{dd}{d \cdot dT}$ ми теж взяли із літературних джерел. Відповідно з [76] цей коефіцієнт має значення $\beta \approx 21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Беручи до уваги розраховані нами величини, із співвідношень (4.9) та (4.27) отримаємо:

$$\chi = -\tau \cdot \left[\frac{2}{(1-r)} \cdot \frac{dr}{dT} + d \cdot \frac{d\alpha}{dT} + d \cdot \alpha \cdot \beta \right] =$$

$$= -0,55 \cdot \exp(-\alpha d) \cdot \left[1,35 \cdot 10^{-5} + (21 \cdot 10^{-6}) \cdot d \cdot \alpha + d \cdot \frac{d\alpha}{dT} \right]. \quad (4.29)$$

Таким чином, чутливість ВОДТ визначається трьома основними складовими: товщиною ЧЕ d , коефіцієнтом поглинання матеріалу ЧЕ α та його температурною чутливістю $d\alpha/dT$ на робочій довжині хвилі при заданій температурі. Традиційно величина коефіцієнта поглинання задається в см^{-1} . Тому розмірністю чутливості χ візьмемо (в.о./К).

Для подальших розрахунків бажаною є явна функціональна залежність коефіцієнта поглинання скла $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$ від температури та від довжини хвилі випромінювання. Вона була визначена нами із спектральних досліджень пропускання ЧЕ із цього скла й наведена вище у вигляді співвідношення (3.13). Згідно з ним похідна коефіцієнта поглинання по температурі буде рівна:

$$\frac{d\alpha}{dT} \approx \alpha \cdot \left[\frac{(19,9 \cdot 10^{-7} \cdot T + 1,2 \cdot 10^{-4}) \cdot (5,1 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,065) - 5,1 \cdot 10^{-5} \cdot (hv + 9,9 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,7)}{(5,1 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,065)^2} \right] \quad (4.30)$$

Позначимо функціональний вираз у квадратних дужках в останньому співвідношенні через функцію двох змінних $Z(h\nu, T)$. Тоді похідна (4.30) буде мати вигляд $d\alpha/dT = \alpha(h\nu, T) \cdot Z(h\nu, T)$. Графіки коефіцієнта поглинання $\alpha(h\nu, T)$ наведені на рис. 3.12, а на рис. 4.6 представлено графіки температурної залежності функції $Z(h\nu, T)$ при різних енергіях фотонів робочого випромінювання. Із наведених результатів слідує, що функція $Z(h\nu, T)$ досить слабо залежить від робочої довжини хвилі випромінювання ВОТ і більш помітно лінійно залежить від температури матеріалу ЧЕ.

Беручи до уваги проведений математичний аналіз можемо записати кінцевий вираз для величини чутливості ВОДТ на основі скла $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$:

$$\chi(h\nu, T) = -0,55 \cdot \exp(-\alpha d) \cdot \left[1,35 \cdot 10^{-5} + d \cdot \alpha(h\nu, T) \cdot [Z(h\nu, T) + 21 \cdot 10^{-6}] \right] \quad (4.31)$$

Із рис. 4.6 слідує, що значення функції $Z(h\nu, T)$ в усій області зміни аргументів $h\nu$ та T майже на два порядки перевищує величину константи $21 \cdot 10^{-6}$. Тоді ми можемо обґрунтовано знехтувати цією константою. Крім того,

розрахунки показали, що перший член у квадратних дужках співвідношення (4.31) також майже на два порядки менший від другого члену навіть для найтонших ЧЕ з $d = 0,1$ мм. У такому разі співвідношення (4.31) дещо спрощується:

$$\chi(h\nu, T) = -0,55 \cdot \exp[-\alpha(h\nu, T) \cdot d] \cdot d \cdot \alpha(h\nu, T) \cdot [Z(h\nu, T)]. \quad (4.32)$$

Отриманий математичний вираз показує, що чутливість ВОДТ на основі напівпровідникових халькогенідних стекел у технічному наближенні визначається лише коефіцієнтом оптичного поглинання матеріалу ЧЕ, який у певній мірі модифікується характеристичною функцією двох змінних $Z(h\nu, T)$ та товщиною самого ЧЕ. Знак "мінус" у формулі для чутливості відмічає той факт, що із ростом температури чутливість ЧЕ зменшується. Надалі при аналізі братимемо до уваги лише абсолютне значення чутливості.

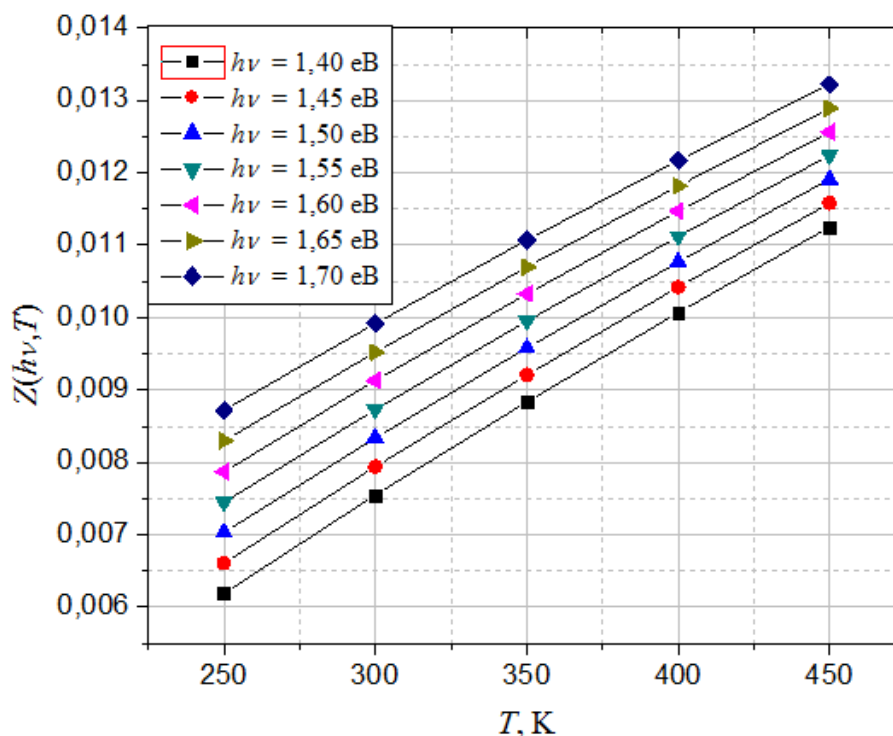


Рис. 4.6. Температурна залежність функції $Z(h\nu, T)$ при значеннях $h\nu$ від 1,4 еВ до 1,7 еВ для скла $As_{45}Se_{55}$

Відзначимо також, що співвідношення (4.32) записане у загальному вигляді для широкого діапазону змін температури та енергії фотонів. Однак реальні значення чутливості воно дає лише для тих параметрів робочих

режимів ВОДТ, у межах яких було виконано математичний аналіз коефіцієнта поглинання $\alpha(h\nu, T)$. Такій умові відповідають інтервали вимірюваних температур від 250 К до 450 К, енергії фотонів від 1,5 еВ до 1,65 еВ (довжини хвиль від 750 нм до 825 нм), величини α від 5 до 35 см^{-1} .

Для аналізу характеру впливу різних параметрів у вказаних вище інтервалах на величину чутливості ВОДТ ми представили останню у вигляді ряду графіків на рис. 4.7. Отримані результати показують, що теоретично досяжними для ВОДТ на основі халькогенідних стекел є чутливості на рівні біля 0,28 %/К. Тобто, зміна температури ЧЕ на 1 К теоретично має приводити до змін його пропускання на 0,28 %. Одночасно видно, що найбільші за значенням чутливості ВОДТ реалізуються на робочих довжинах хвиль біля 0,8 мкм.

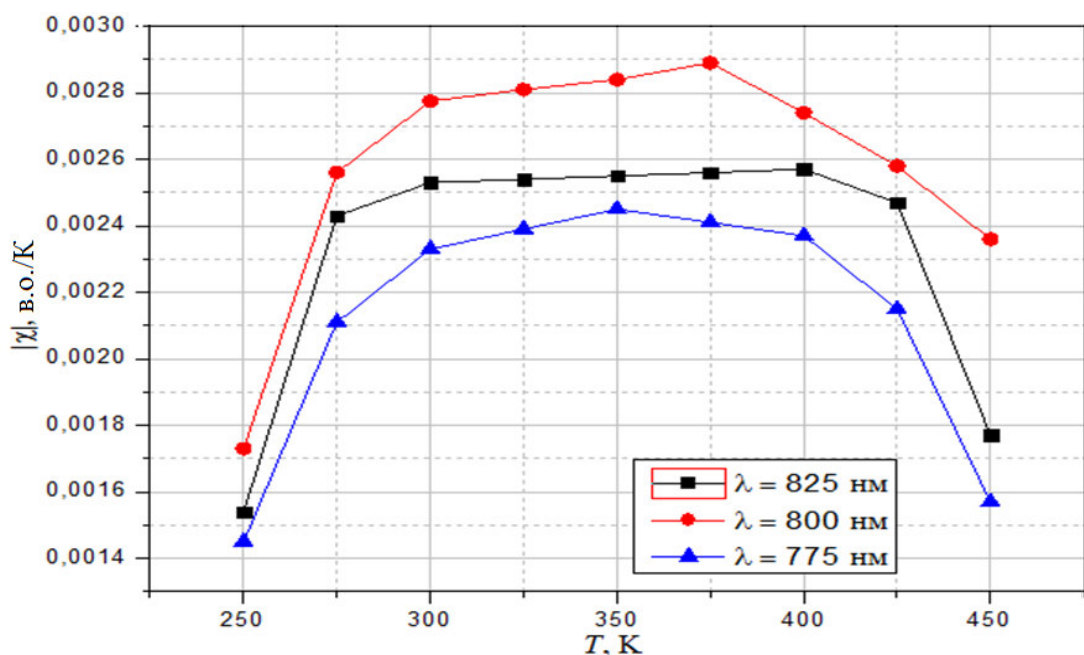


Рис. 4.7. Чутливість ВОДТ на основі халькогенідного скла $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$ для різних робочих довжин хвиль (товщина ЧЕ 0,4 мм)

Проведений аналіз також показує, що діапазон вимірюваних температур ВОДТ на основі скла $\text{As}_{45}\text{Se}_{55}$ доцільно обмежити інтервалом від 270 К до 430 К. У межах даного інтервалу чутливість ВОДТ є максимальною і приблизно постійною (рис.4.7.). За межами ж вказаного інтервалу чутливість різко спадає.

4.5 Вплив температурної та спектральної нестабільності параметрів оптичного тракту на чутливість ВОДТ

4.5.1 Вплив спектральної нестабільності параметрів оптичного тракту на чутливість ВОДТ

При аналізі параметрів будь-яких сенсорів використовують статичну функцію перетворення, яка встановлює залежність вихідного інформаційного параметра сенсора від значення вимірюваної величини (у нашому випадку залежність пропускання від температури) в усталеному режимі. Для цього доцільно використовувати нормовані характеристики та параметри елементів оптичної схеми. Для нашого ЧЕ основним таким параметром є його оптичне пропускання, яке представляє собою сильно змінну функцію від довжини хвилі випромінювання λ в робочій спектральній області. Тому важливим є дослідження впливу на чутливість ВОТ неконтрольованих варіацій величини λ оптичного тракту. Для аналізу даного питання зручніше використовувати в якості аргументу функцій пропускання не довжину хвилі випромінювання λ , а енергію його квантів $x = h\nu$, як і в попередньому підрозділі.

Введемо в розгляд коефіцієнт спектральної нестабільності ВОДТ при фіксованій температурі в такому математичному вигляді:

$$B(h\nu, T) = B(x, T) = \frac{d\tau(x, T)}{dx}. \quad (4.33)$$

Диференціювання проведемо, враховуючи явний вид функції пропускання аналогічно попередньому підрозділу. У результаті отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{d\tau}{dx} &= -2(1-r) \frac{dr}{dx} \cdot \exp(-\alpha d) - (1-r)^2 \cdot \exp(-\alpha d) \cdot \left(d \cdot \frac{d\alpha}{dT} \right) = \\ &= -(1-r)^2 \cdot \exp(-\alpha d) \cdot \left(\frac{2}{1-r} \cdot \frac{dr}{dx} + d \cdot \frac{d\alpha}{dx} \right) = -\tau \cdot \left(\frac{2}{1-r} \cdot \frac{dr}{dx} + d \cdot \frac{d\alpha}{dx} \right). \end{aligned} \quad (4.34)$$

Використовуючи проведений вище математичний аналіз похідної коефіцієнта відбивання по температурі, за аналогією запишемо:

$$\frac{dr}{dx} = 0,12 \cdot \frac{dn}{dx}. \quad (4.35)$$

Похідна функції коефіцієнта відбивання ЧЕ по енергії квантів випромінювання визначається аналітично через показник заломлення матеріалу ЧЕ за допомогою отриманого вже нами співвідношення (4.35). Тоді:

$$\frac{dr}{dx} = 4 \frac{n-1}{(n+1)^3} \cdot \frac{dn}{dx}. \quad (4.36)$$

Таким чином, для розрахунків нам потрібно знати дисперсію показника заломлення скла $As_{45}Se_{55}$ в околі робочої довжини хвилі ВОДТ, тобто біля 0,8 мкм. Для цього використовуємо результати досліджень дисперсії показника заломлення халькогенідних стекол із роботи [73]. На основі експериментальних даних у цій роботі отримана явна функціональна залежність показника заломлення від довжини хвилі випромінювання в області краю поглинання:

$$n^2(\lambda) = 7,56 + \frac{1,03}{\lambda^2} + \frac{0,12}{\lambda^4}. \quad (4.37)$$

Провівши в даному виразі заміну змінної λ на $h\nu = x$ та провівши диференціювання, ми отримали (при умові, що енергія фотонів задається в еВ):

$$\frac{dn}{dx} \approx \frac{1}{n} \cdot (0,34 \cdot x + 0,1 \cdot x^3). \quad (4.38)$$

Робочій області ВОДТ відповідають енергії фотонів випромінювання біля $x_0 = 1,55$ еВ. Тоді прості підрахунки дають:

$$\left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=x_0} \approx 0,32 \text{ [(eV)}^{-1}] \quad \text{і} \quad \left. \frac{dr}{dx} \right|_{x=x_0} \approx 0,04 \text{ [(eV)}^{-1}]. \quad (4.39)$$

Отримані дані показують, що вклад у спектральну нестабільність процесів відбивання випромінювання від поверхонь ЧЕ характеризується величиною:

$$\frac{2}{1-r} \cdot \left. \frac{dr}{dx} \right|_{x=x_0} \approx 0,1 \text{ [(eV)}^{-1}]. \quad (4.40)$$

Похідну коефіцієнта поглинання скла $As_{45}Se_{55}$ по енергії квантів випромінювання легко знайти із співвідношення (4.40):

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{\alpha}{E_0(T)}. \quad (4.41)$$

Аналіз показує, що кількісні значення похідної da/dx майже на три порядки перевищують величину $0,1 \text{ eV}^{-1}$ і останньою можна знехтувати у співвідношенні (4.41). У результаті, із врахуванням явних виразів для коефіцієнта пропускання τ та для енергії $E_0(T)$, отримуємо для коефіцієнта спектральної нестабільності:

$$B(x,T) \approx -\tau(x,T) \cdot d \cdot \frac{\alpha(x,T)}{E_0(T)} = -\frac{0,55 \cdot \exp[-d \cdot \alpha(x,T)] \cdot d \cdot \alpha(x,T)}{5,05 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,065} \text{ [(eV)}^{-1}\text{]}. \quad (4.42)$$

Таким чином, спектральна нестабільність ВОДТ на основі напівпровідникових матеріалів залежить явно від температури та від добутку $(d \cdot \alpha)$ ЧЕ в заданих умовах експлуатації. На рис. 4.8 наведено температурні залежності цього коефіцієнта для різних робочих довжин хвиль. Отримані результати показують, що теоретичні кількісні значення коефіцієнта нестабільності лежать в діапазоні від 1 в.о./eV^{-1} до 3 в.о./eV^{-1} . При цьому для різних робочих довжин хвиль спостерігається різна його температурна поведінка. Зокрема, для більш коротких λ_0 графік такої залежності має вигляд параболи з максимумом. В області ж довгих робочих довжин хвиль коефіцієнт спектральної нестабільності майже монотонно зростає. Для оптимальних же значень λ_0 коефіцієнт $B(h\nu, T)$ можна вважати практично постійним на рівні 2 в.о./eV^{-1} у всьому робочому температурному діапазоні від 273 К до 450 К . Відмітимо, що таке теоретичне значення коефіцієнта нестабільності досить неточне. Це обумовлено тим, що теоретичною математичною моделлю передбачається збереження характерної поведінки краю поглинання в широкому спектральному діапазоні, який охоплює зміну енергії фотонів в інтервалі біля 1 eV^{-1} . Реально ж цей діапазон має на порядок меншу ширину.

Для оцінки впливу коефіцієнта спектральної нестабільності на точність вимірювання температури ВОТ, розрахуємо діапазон допустимих варіацій $\Delta(h\nu)$, які даватимуть абсолютну похибку пропускання ЧЕ, на порядок меншу за його температурну чутливість $\chi = 0,28 \text{ в.о.}$ Виходячи із визначення коефіцієнтів χ та B , для робочих довжин хвиль біля $0,8 \text{ мкм}$ отримаємо:

$$\Delta(h\nu) = 0,1 \cdot \chi / B \approx 0,015 \text{ eV (або } \approx 0,01 \text{ мкм)}. \quad (4.43)$$

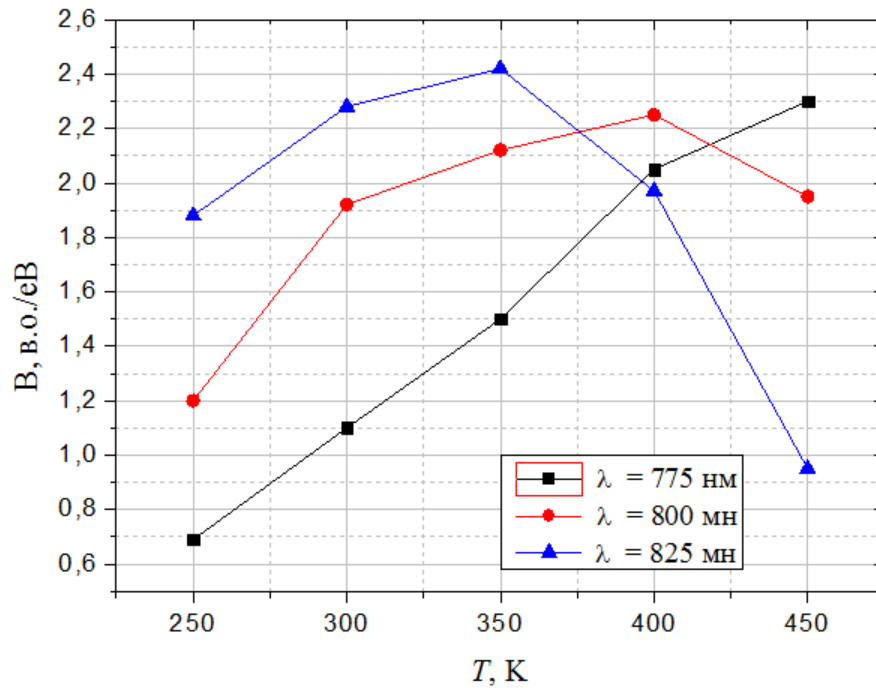


Рис. 4.8. Температурна залежність коефіцієнта спектральної нестабільності ВОДТ на основі стекл $As_{45}Se_{55}$ для різних робочих довжин хвиль

Таким чином оптичний тракт ВОТ на основі напівпровідникових матеріалів має забезпечувати стабільність робочої довжини хвилі на рівні її варіації не більше $\pm 0,01$ мкм. Одночасно, одержаний вираз для коефіцієнта спектральної нестабільності дає можливість проводити прогнозований вибір матеріалів ЧЕ та елементів оптичного тракту ВОТ і оптимізувати їх параметри.

4.5.2 Аналіз спектральної та температурної стабільності джерела випромінювання

Основним джерелом спектральної нестабільності в оптичному тракті ВОТ є світлодіоди, дослідження цього впливу нами проводилися у роботі [77]. При цьому значно стабільнішими спектральними параметрами характеризуються саме лазерні світлодіоди або напівпровідникові лазери. Тому є зміст проаналізувати стабільність спектральних параметрів саме таких напівпровідникових приладів. Фізичні принципи їхньої роботи обумовлюються процесами стимульованої рекомбінації електрон-діркових пар, збуджених за

рахунок інжекції вільних носіїв зарядів в область $p-n$ - переходу зовнішньою електрорушійною силою. Випромінювальні рекомбінаційні переходи у світлодіодах є прямими, при яких сума хвильових векторів електрона і фотона відрізняються на постійну величину. Спектр випромінювання при такій прямій рекомбінації дірки та електрона може бути представлений таким математичним виразом [78]:

$$I(h\nu, T) = (\nu)^2 \cdot I_0(T) \cdot \exp\left[\frac{-(h\nu - E_g(T))}{kT}\right]^2, \quad (4.44)$$

де $I_0(T)$ - параметр, який визначається властивостями напівпровідникового матеріалу світлодіода.

Із даного співвідношення слідує, що спектральний розподіл інтенсивності залежить від ширини забороненої зони матеріалу світлодіода та його температури. Оскільки ширина забороненої зони у свою чергу залежить від температури, то саме остання буде в найбільшій мірі впливати на спектральну стабільність випромінювання.

Для аналізу характеру впливу змін температури світлодіода на спектральну стабільність його випромінювання візьмемо похідну функції випромінювання по температурі. При цьому, як і раніше, будемо для спрощення запису опускали змінні функцій в наведених виразах. Тоді:

$$\frac{dI}{dT} = (\nu)^2 \cdot \frac{dI_0}{dT} \cdot \exp\left[\frac{-h\nu + E_g(T)}{kT}\right]^2 + (\nu)^2 \cdot I_0 \cdot \frac{d}{dT} \left\{ \exp\left[\frac{-h\nu + E_g(T)}{kT}\right]^2 \right\}. \quad (4.45)$$

У параметр $I_0(T)$ входять складові, які описують густину станів в енергетичних зонах напівпровідника та задають ймовірності різного типу переходів між цими станами. Ці складові слабо залежать від температури напівпровідникового матеріалу. Тому будемо вважати, що перший член у співвідношенні (4.45) вносить слабкий вклад у спектральну нестабільність лазерних світлодіодів і ним можна знехтувати. Тоді:

$$\frac{dI}{dT} = 2 \cdot (\nu)^2 \cdot I_0 \cdot \exp\left[\frac{-h\nu + E_g(T)}{kT}\right]^2 \cdot \left[\frac{-h\nu + E_g(T)}{kT}\right] \cdot \left[\frac{\frac{dE_g(T)}{dT} \cdot kT + kh\nu - k \cdot E_g(T)}{k^2 T^2}\right]. \quad (4.46)$$

Провівши математичні перетворення та ввівши нову безрозмірну функціональну змінну $Z_1(h\nu, T) = [h\nu - E_g(T)]/kT$, отримаємо:

$$\frac{dI}{dT} = -2 \cdot I \cdot Z_1(h\nu, T) \cdot \left[\frac{1}{kT} \frac{dE_g(T)}{dT} + \frac{Z_1(h\nu, T)}{T}\right]. \quad (4.47)$$

З останнього виразу слідує, що відносна спектральна нестабільність джерела випромінювання ВОТ B буде визначатись наступним аналітичним співвідношенням:

$$B(h\nu, T) = \frac{dI}{dT} \cdot \frac{1}{I} = \frac{-2 \cdot Z_1(h\nu, T)}{kT} \frac{dE_g(T)}{dT} - \frac{2 \cdot Z_1^2(h\nu, T)}{T}. \quad (4.48)$$

Таким чином, у результаті теоретичного аналізу ми отримали, що відносна спектральна нестабільність джерела випромінювання визначається лише температурною залежністю ширини забороненої зони його матеріалу. При цьому величина $E_g(T)$ впливає на параметр $B(h\nu, T)$ двояко: через свою похідну по температурі та за рахунок входження у функцію $Z_1(T)$.

Отриманий нами вираз (4.48) з відомої температурної залежності ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу світлодіоду дає можливість проводити аналіз впливу зміни температури джерела випромінювання на точність ВОТ. Для цього ми розраховали функції $Z_1(h\nu, T)$ та $dE_g(T)/dT$ використаного нами світлодіода із кристалічного GaAs, графіки яких наведено на рис. 4.9 та рис. 4.10. При розрахунках було використано явний вид функції $E_g(T)$, отриманий в роботі [53].

Із наведених результатів слідує незначна залежність похідної ширини забороненої зони матеріалу ЧЕ від температури. При цьому величина таких змін збільшується із ростом температури і досягає максимального значення біля 0,0005 еВ/К в області температур 500 К. Не дивлячись на малі кількісні значення цієї функції, у виразі для спектральної нестабільності вона комбінує із

змінною температури та із функцією $Z_1(h\nu, T)$, що може привести до суттєвого її впливу на величину параметра B .

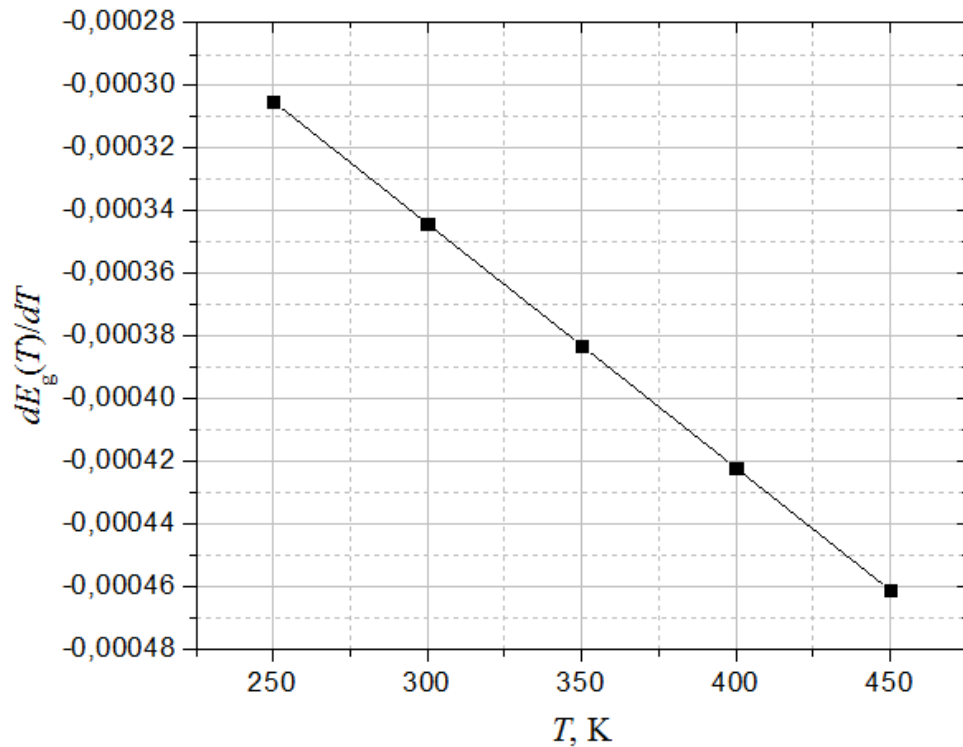


Рис. 4.9. Графік функцій $dE_g(T)/dT$ кристалу GaAs

Особливістю функції $Z_1(h\nu, T)$ є її дуже слабка залежність від енергії фотонів випромінювання лазерних світлодіодів (рис. 4.10). Тому проводити надалі теоретичний аналіз питань спектральної нестабільності джерела випромінювання для всього робочого спектрального діапазону ВОТ можна із застосуванням наближеної єдиної функції $Z_1(T)$, яка рівна $Z_1(h\nu, T)$ при $h\nu = 1,25$ еВ.

Використавши відмічені наближення, ми розрахували значення параметра $B(h\nu, T)$ при різних робочих температурах світлодіодів оптичного тракту ВОДТ із кристалів GaAs. Графік отриманої залежності наведено на рис. 4.11. Він показує, що робоча температура сильно впливає на спектральну стабільність випромінювання вибраного нами джерела. Особливо значний цей вплив при низьких температурах, включаючи й кімнатні, при яких відносні зміни інтенсивності джерела випромінювання на фіксованій довжині хвилі можуть досягати 10 %. Таким чином у ВОТ обов'язковою має бути стабілізація

температури тієї частини середовища, у якій знаходиться випромінюючий лазерний світлодіод. До речі, це відповідає і рекомендаціям фірми-виробника приладів Texas Instruments .

Параметр $B(h\nu, T)$ характеризує спектральну нестабільність джерела випромінювання на фіксованій довжині хвилі. Представляє інтерес оцінити й інтегральну нестабільність світлодіодів, яка знаходиться як їхній нормований параметр за таким співвідношенням:

$$B_I(\lambda, T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T) \cdot H(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} H(\lambda, T) d\lambda}, \quad (4.49)$$

де $H(\lambda, T)$ – спектральна густина випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла при колірній температурі 2848 К (еталонне джерело типу А [80]). Результати проведених за такими даними розрахунків наведені на рис. 4.12.

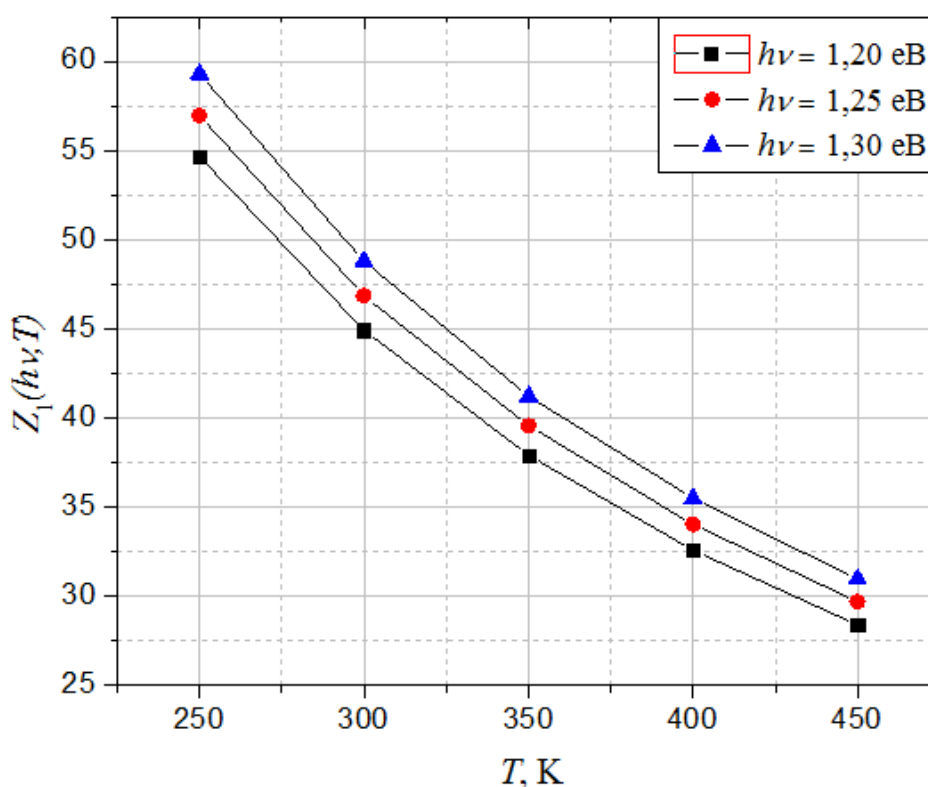


Рис. 4.10. Графіки функції $Z_1(h\nu, T)$ кристалу GaAs для різних енергій фотонів випромінювання світлодіодів

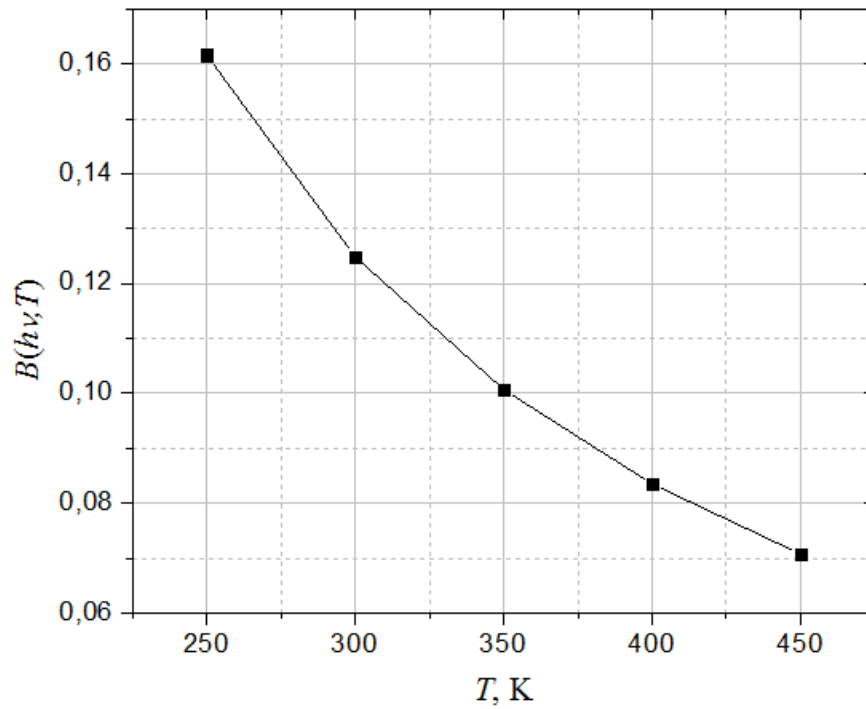


Рис. 4.11. Залежність спектральної нестабільності $B(h\nu, T)$ лазерних світлодіодів із кристалів GaAs

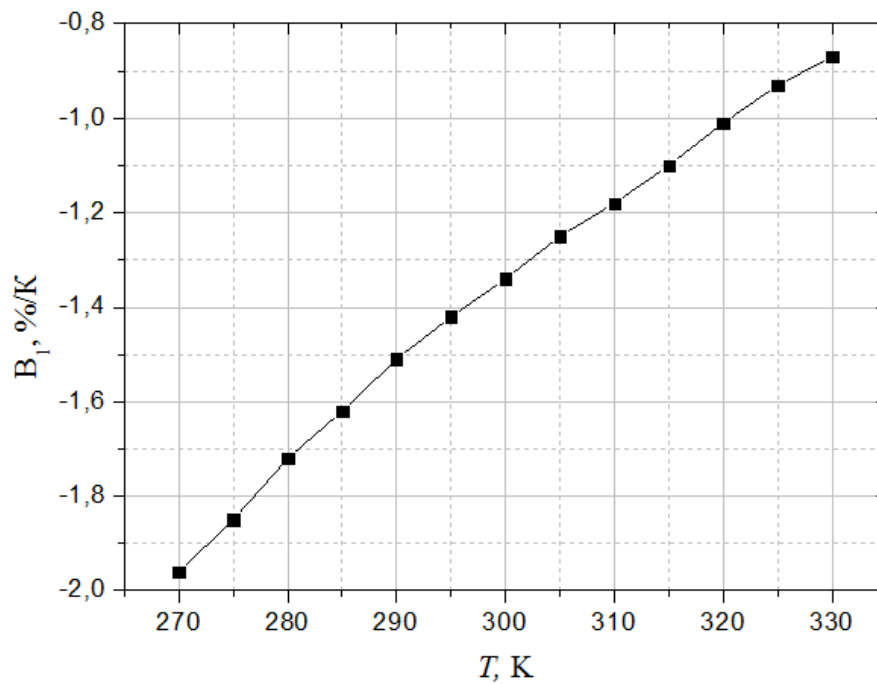


Рис. 4.12. Залежність відносної зміни нормованої інтегральної випромінювальної здатності лазерного світлодіода із GaAs від температури

Отримані результати показують, що інтегральна нестабільність лазерних світлодіодів також зменшується із ростом температури, як і їхня спектральна

нестабільність. Але величина інтегральних змін на порядок менша і не перевищує 2 %. Тобто, зміна температури світлодіодів переважно призводить до зміщення їх спектральної смуги випромінювання, слабо змінюючи при цьому його інтегральний потік.

4.6 Експериментальні дослідження параметрів ВОДТ та оцінка їх експлуатаційних характеристик

Експериментальні дослідження термочутливих елементів та конструкцій оптичних схем для ВОДТ проводилися на базі установки описаної у розділі 2 пункт 2.4 даної роботи. Блок-схема експериментальної установки для дослідження експлуатаційних характеристик ВОДТ приведена на рис. 2.12. У дослідженнях використовувалися взірці виготовлені різними способами, у тому числі і за методикою описаною у пункті 2.1. Основна мета даних досліджень полягала в експериментальному дослідженні передавальної характеристики розробленого первинного вимірювального перетворювача (ПВП) для ВОДТ, а також оцінці їх метрологічних та експлуатаційних характеристик.

Для дослідження експлуатаційних характеристик аналізованих у даній роботі ВОДТ на основі кристалічних та халькогенідних склоподібних напівпровідникових термочутливих елементів було розроблено функціональну схему пристрою, що дозволяла швидко змінювати термочутливий елемент досліджуваного ВОДТ. Проаналізувавши різні типи функціональних схем ВОДТ було вирішено зупинитися на варіанті з амплітудною модуляцією оптичного сигналу на фіксованій характеристичній довжині хвилі. Такі датчики завдяки простоті їх конструкції, надійності, відтворюваності результатів та задовільним технічним характеристикам, а також можливості застосування в зонах підвищеної пожежної та вибухової небезпеки, все частіше застосовуються в техніці і промисловості. Принцип роботи таких датчиків базується на реєстрації зміни пропускання напівпровідникового чутливого елемента на фіксованій довжині хвилі при варіації температури. В цьому плані

велика увага приділяється спеціалізованому приладу, який призначений для реєстрації і першочергової аналогової обробки інформаційного сигналу, який отримується ВОДТ та оцінки похибок вимірювання таким способом. Оскільки вартість спектральних комплексів для дослідження оптичних волокон є досить великою, то для визначення технічних характеристик, тестування та градування ВОДТ з чутливими елементами на основі напівпровідників (кристалічних, склоподібних та аморфних матеріалів) не є технічно доцільним. Тому постає задача розробки спеціалізованих регістраторів інформаційних сигналів, отриманих на ВОДТ в експресному режимі. Це означає, що такий прилад має забезпечувати контрольовані світлові потоки, які генеруються та фіксуються безінерційними оптоелектронними приладами (світлодіод, фотодіод) та сучасною схемою обробки оптичного сигналу, отриманого за допомогою ВОДТ з чутливим елементом.

В якості елементної бази використовувалися дискретні елементи, які формували схему спеціалізованого підсилювача типу «модулятор / демодулятор», однак як показав досвід застосування такої схеми досягти необхідної завадостійкості та дрейфу нуля не вдалося за рахунок розкиду параметрів польових транзисторів, на яких було реалізовано ключові елементи модулятора і демодулятора. Застосування другого підходу привело до включення в схему замість світлодіода потужного інжекційного твердотілого лазера, що привело до суттєвого нагрівання як чутливого елемента так і чутливої площадки регіструючого фотодіода, хоча при цьому суттєво покращилося співвідношення сигнал/шум.

У даній роботі запропоновано інноваційний блок аналогової обробки вимірювальної інформації для ВОДТ з амплітудною модуляцією оптичного сигналу [81, 82]. В основу схеми покладено принцип нетрадиційного використання інтегральної мікросхеми К140УД13 [83, 84], яка є елементом «модулятора/демодулятора» і забезпечує захист вихідного сигналу від впливу інтермодуляційних завад, несанкціонованих засвіток та впливу мультиплікативних завад. Комбінована структурна схема оптоелектронного

регистратора наведена на рис. 4.13. Умовно вона поділена на дві частини: вузол випромінювача, який забезпечує модульований стабілізований потік світла та вузол фотоприймача на основі підсилювача та демодулятора, який підключається через оптоволоконний роз'єднувач до ВОДТ.

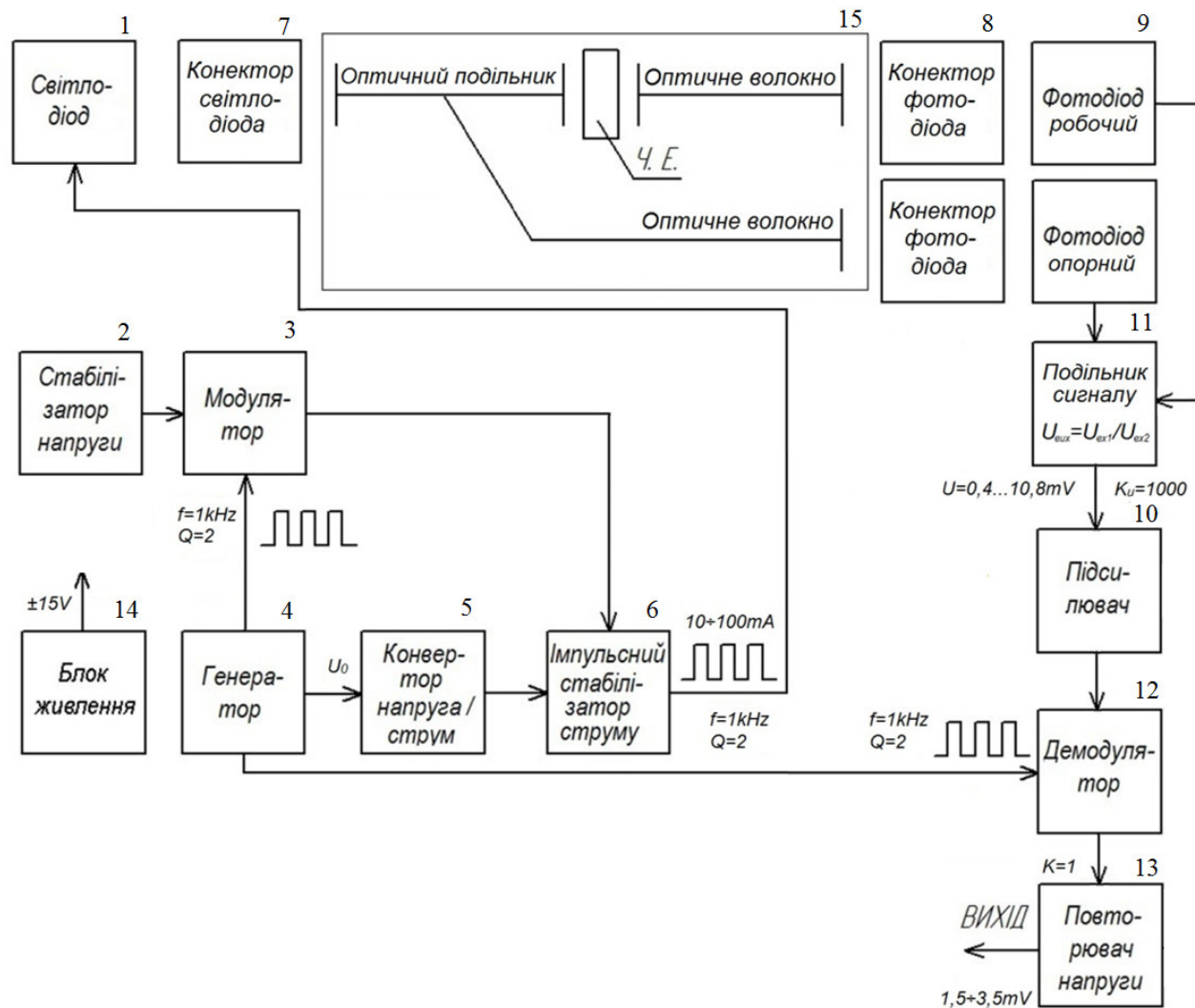


Рис. 4.13. Комбінована структурна схема оптоелектронного регістратора для дослідження експлуатаційних характеристик ВОДТ

Схема модуляції випромінювання світлодіода складається із модулятора (3), вбудованого в мікросхему генератора (4) та стабілізатора вхідної напруги (2). Модулятор побудований на парі узгоджених польових транзисторів КМДН і модулює (за амплітудою) вхідну стабілізовану напругу частотою $f_m = 1$ кГц

шпаруватістю ($Q = 2$). Імпульси модульованої напруги заданої амплітуди подаються на перетворювач «напруга/струм» та імпульсний транзисторний стабілізатор струму (6). Імпульси напруги з такими ж технічними характеристиками створюють на виході стабілізатора струму імпульси, амплітуда яких може модулюватися від 10 до 100 мА, які забезпечують живлення обраного світлодіода (1), що обслуговує ВОДТ. Імпульсне випромінювання світлодіода проходить волоконно-оптичний тракт та залежно від температури змінює свою амплітуду, на виході ВОДТ (8). Фотодіод (9) фіксує зміну оптичного сигналу. Підсилювач (10) підсилює амплітуду до необхідної для послідуєчої обробки величини і подає цей сигнал на демодулятор. Демодулятор перетворює цей імпульсний сигнал на частоті 1 кГц синхронно і синфазно з ключовими елементами модулятора (3). Практично ключовим елементом демодулятора є ідентичні польові транзистори, які застосовані в модуляторі, що забезпечує синхронність і синфазність роботи модулятора і демодулятора. В результаті на виході демодулятора отримується постійна складова вихідного інформаційного сигналу, яка відповідає зміні пропускання ВОДТ при варіації температури. Для узгодження вихідного сигналу з вхідним навантаженням різних пристроїв обробки в схему введено додатковий операційний повторювач напруги, який забезпечує достатньо хорошу узгодженість по вхідному і вихідному імпедансу. Це дозволяє використовувати різноманітні індикаторні прилади починаючи від аналогових стрілочних вольтметрів до сучасних АЦП у тому числі, які входять до складу мікроконтролерів.

Електрична принципова схема на основі якої було побудовано оптоволоконний реєстратор для дослідження експлуатаційних характеристик різних волоконно-оптичних схем приведено у додатку В.

На першому етапі проводилися дослідження термочутливих елементів для ВОДТ за допомогою експериментальної установки приведеної на рис. 2.12. Конструкція установки виконана таким чином, щоб забезпечувати можливість швидкої заміни оптичної пари та досліджуваного термочутливого елемента.

З'єднання елементів оптичної схеми було виконано на основі роз'ємних оптичних конекторів, конструкція яких описана у розділі 4 даної роботи.

На рис. 4.1 приведено конструкції розробленого оптичного конектора для джерела випромінювання 1. Фокусування випромінювання для введення в оптичне волокно 5 відбувається за допомогою мініатюрної лінзи 3, яка розміщується у середині основи 2. А для забезпечення співвісності оптичних елементів та встановлення джерела на необхідній відстані від лінзи використано тримач 4, у якому фіксується джерело випромінювання. За допомогою конічної гайки затискача 6 фіксують оптичне волокно 5 у необхідному положенні, а гайка фіксатор 7 утримує джерело випромінювання 1.

Дана конструкція дозволяє легко замінити джерело випромінювання в оптичній схемі ВОДТ та дає можливість значно збільшити кількість випромінювання, що потрапляє в оптичне волокно.

Подібний конектор також використовувався для приймачів випромінювання.

Розміщення термочутливого елемента в оптичній схемі ВОДТ також додає певних труднощів, що потребують вирішення: конструкція повинна мати малу теплову інерційність, її елементи повинні мати близькі теплові коефіцієнти розширення та давати змогу замінити досліджуваний взірець. Використана у дослідженнях конструкція приведена на рис. 4.14.

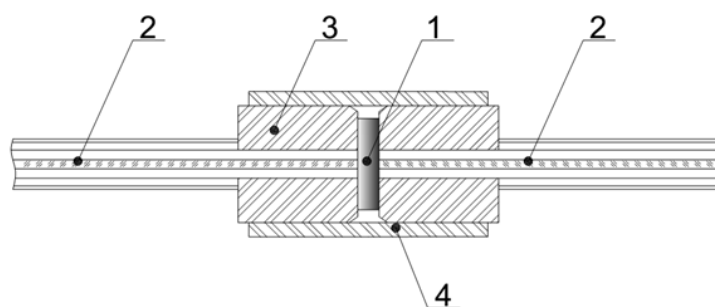


Рис. 4.14. Схема конструкції тримача для термочутливого елемента оптичної схеми ВОДТ: 1 - термочутливий елемент; 2 - оптичне волокно; 3 - стержень; 4 - трубка

Розроблений тримача термочутливого елемента (рис. 4.14), що використовувався в оптичній схемі експериментальної установки для дослідження ВОДТ складається з досліджуваного взірця термочутливого елемента 1, оптичних волокон 2, двох керамічних стержнів 3 у яких затиснуті кінці волокон та трубки 4 з поздовжнім розрізом. Стержні 3 і трубка 4 виготовлені з оптичної кераміки та призначені для центрування оптичних волокон і утримання досліджуваного взірця. Дана конструкція кріплення термочутливого елемента виявилася найбільш оптимальною з усіх варіантів кріплення взірця в оптичному тракті ВОДТ.

Практичні дослідження проводилися з використанням компонентів оптичної схеми, що описана у пункті 3.2.1 теоретичних розрахунків, що дозволило провести порівняльний аналіз результатів теоретичного розрахунку передавальної характеристики та результатів отриманих при проведенні експериментальних досліджень. На рис. 4.15 показано зведений графік передавальної характеристики ВОДТ отриманий у результаті теоретичного розрахунку та практичних досліджень.

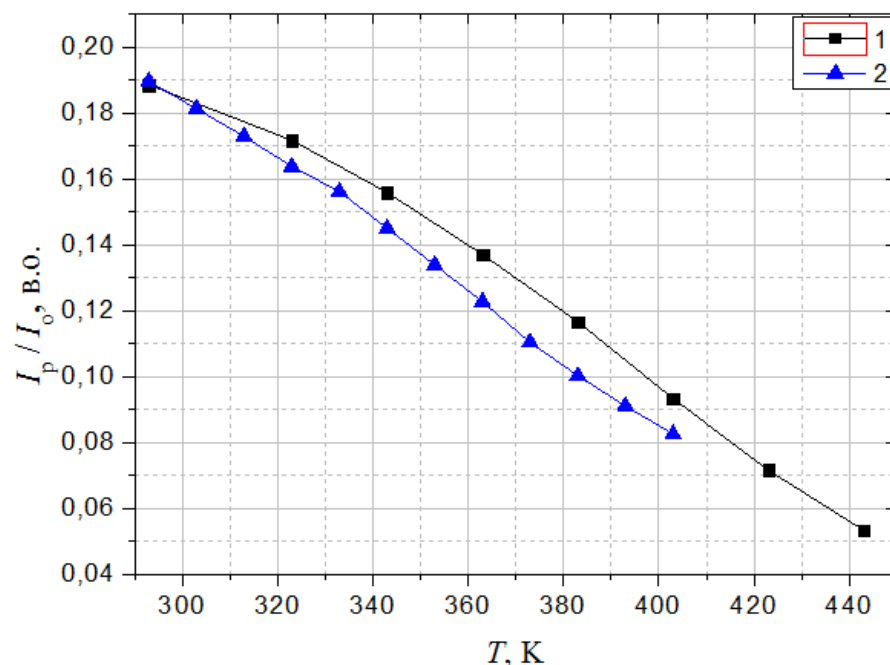


Рис. 4.15. Передавальна характеристика ВОДТ отримана у результаті теоретичних та практичних досліджень: 1 - інтегральний розрахунок; 2 - експериментальне дослідження

Як видно з графіка рис. 4.15 криві 1, 2 мають близький нахил. Практичний результат дослідження - крива 2 має деяку розбіжність з кривою 1, що пов'язано із значними проблемами при врахуванні усіх факторів та ефектів, що можуть вплинути на передавальну характеристику ВОДТ.

На другому етапі практичних досліджень проводився аналіз стабільності та повторюваності вимірювання температури. Дані дослідження виконувалися наступним чином: поміщений у термобокс 6 (рис. 2.11) термочутливий елемент нагрівали до максимальної температури вимірювання ВОДТ та знову охолоджували до кімнатної температури із заданою швидкістю. Досліди проводилися циклічно із забезпеченням від одного до десяти повних циклів нагріву та охолодження досліджуваного термочутливого елемента.

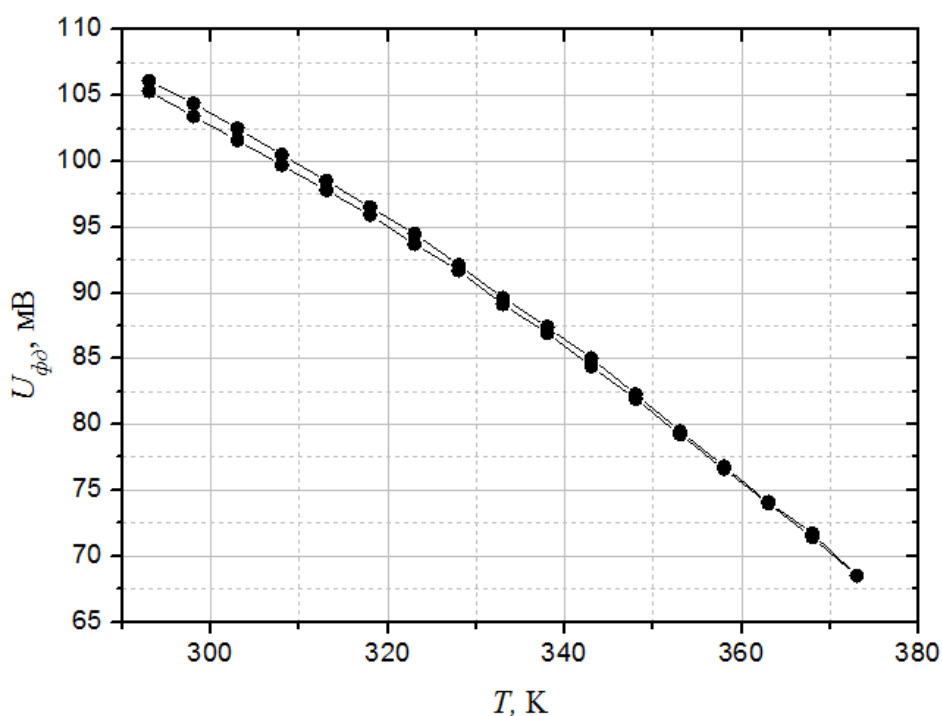


Рис. 4.16. Графік залежності напруги фотоприймача від температури термочутливого елемента досліджуваної оптичної схеми ВОДТ

На рис. 4.16 приведено графік залежності напруги фотоприймача досліджуваної оптичної схеми ВОДТ від температури термочутливого елемента при першому нагріванні і охолодженні взірця зі швидкістю не більше 0,5 К/хв. Як видно з рис. 4.16 між циклами нагрівання та охолодження термочутливого

елемента при першому нагріванні спостерігається невеликий гістерезис показів, що може бути пов'язаним з особливостями будови халькогенідних стекел та інерційністю зміни температури термочутливого елемента, який поміщено у середину керамічного тримача (рис. 4.14).

На рис 4.17 приведено графік залежності напруги фотоприймача від зміни температури термочутливого елемента при декількох циклах його нагрівання та охолодження.

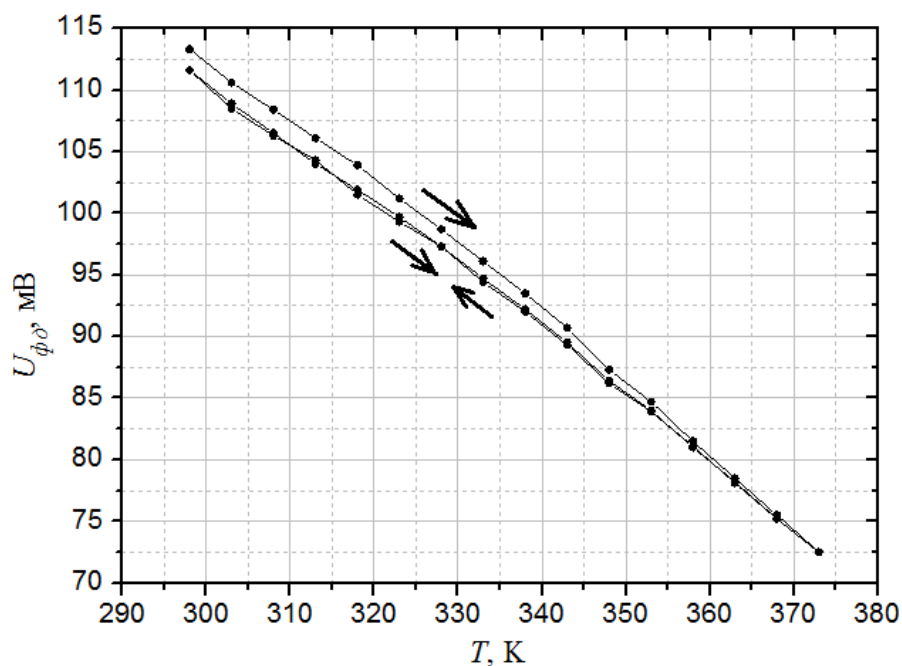


Рис. 4.17. Графік залежності напруги фотоприймача від температури термочутливого елемента при декількох циклах його нагрівання і охолодження

Як видно на рис. 4.17, після першого нагрівання спостерігається невеликий гістерезис показів. Усі подальші нагрівання та охолодження взірця знаходяться у межах похибки вимірювання, що свідчить про повторюваність показів та стабільність роботи взірця оптичної та електронної схеми ВОДТ.

Висновки до розділу 4

1. Проведено розрахунок проходження оптичного випромінювання через робочий та опорний канали оптимізованого оптичного тракту ВОТ із ЧЕ на основі скла $As_{45}Se_{55}$. При цьому враховувались:

- просторовий розподіл потоку інтенсивності джерела випромінювання;
- вплив введення фокона в конструкцію оптичного тракту (експериментальні вимірювання показали, що коефіцієнт ефективності використаного нам фокона $k \approx 3,9$);
- френелівське відбивання на всіх межах розділу оптичних середовищ обох каналів;
- довжина оптичного тракту 1 км з погонним коефіцієнтом втрат ОВ 0,5 дБ/км);
- коефіцієнт поділу у Y-розгалужувача, який ділить оптичний тракт на опорний та робочий канали;
- коефіцієнт пропускання ЧЕ при різних температурах.

Результати моделювання показали, що при коефіцієнті поділу випромінювання в Y - подільнику $y = 0,5$ в.о. на робочій довжині хвилі 0,808 мкм коефіцієнти пропускання робочого та опорного каналів відповідно рівні 0,098 в.о. та 0,34 в.о. при температурі біля 300 К і 0,002 в.о. та 0,33 в.о. при температурі біля 450 К.

2. Теоретично розраховані потужності випромінювання на виході обох каналів оптичного тракту, які були рівні близько 11 мВт для опорного каналу та змінювалися від 0,64 мВт до 3,1 мВт для робочого каналу при зміні температури в діапазоні від 300 до 450 К. Із даних результатів слідує, що при $y = 0,5$ приймаючі фотодіоди опорного й робочого каналів ВОТ будуть працювати у досить нееквівалентних умовах у всьому діапазоні вимірювальних температур. Проведена нами оптимізація дозволила знайти оптимальну величину коефіцієнта поділу $y \approx 0,8$. У такій конструкції потужності випромінювання на виході оптичного тракту наближаються до 4,4 мВт для опорного каналу та змінюються в межах від 1 мВт до 5 мВт для робочого каналу. Дані величини потужності випромінювання можуть бути досить надійно виміряні сучасними фотодіодами з незначною похибкою.

3. Методами моделювання та теоретичними розрахунками показано, що вплив температурних змін релеївського розсіювання в матеріалах оптичного

тракту, температурних змін коефіцієнта відбивання на межах поділу оптичних середовищ та спектральної нестабільності джерела випромінювання зумовлює сумарну відносну похибку інтенсивності випромінювання на виході оптичного тракту, яка не перевищує 0,5 %. Дана похибка реально буде ще менша за рахунок використання у ВОТ двохканальної схеми оптичного тракту.

4. Теоретично розраховані спектральні розподіли потужності випромінювання джерела випромінювання та чутливості фотоприймача в абсолютних одиницях. На основі таких розподілів та отриманого раніше явного вигляду функції $\alpha(h\nu, T)$ матеріалів ЧЕ створено модель розрахунків струмів фотодіодів робочого і опорного каналів ВОТ. Створена модель дозволяє швидко проводити моделювання та оптимізацію експлуатаційних характеристик ВОДТ із різних напівпровідникових матеріалів.

5. Проведено теоретичний аналіз впливу флуктуацій густини та товщини ЧЕ на точність вимірювань температури ВОТ. Показано, що даний вплив є суттєвий і вимагає чіткого контролю технологічних умов виготовлення ЧЕ з проведенням індивідуальної паспортизації кожного ЧЕ, який встановлюється у ВОДТ.

6. Отримано у явному вигляді функцію температурної чутливості ВОДТ на основі напівпровідникових халькогенідних стекол. Показано, що цей параметр визначається лише функцією оптичного поглинання матеріалу ЧЕ $\alpha(h\nu, T)$ та товщиною самого ЧЕ. Аналіз температурної поведінки чутливості свідчить про те, 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. За межами ж вказаного інтервалу чутливість різко спадає.

7. Проаналізовано вплив спектральної нестабільності параметрів оптичного тракту ВОДТ на його чутливість. Показано, 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 теоретичні дослідження спектральної та

температурної стабільності параметрів джерела випромінювання свідчать про необхідність термостабілізації блока світлодіода для забезпечення високої чутливості та точності вимірювань ВОТ.

8. Розроблено структурну схему для експериментального стенду 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. При цьому виявлено хорошу кореляцію експериментальних параметрів макету ВОТ із результатами теоретичного моделювання ЧЕ та ВОДТ на основі скла $As_{45}Se_{55}$.

9. Здійснено експериментальні дослідження ЧЕ виготовлених з халькогенідного скла $As_{45}Se_{55}$ у кілька циклів нагріву та охолодження для перевірки стабільності роботи ЧЕ. Дані дослідження показали повторюваність у межах допустимої похибки даної характеристики при циклічному нагріванні та охолодженні ЧЕ.

ЗАГАЛЬНІ 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 методу 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 точність 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Distributed Fiber Optic Sensor Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application, By Technology, By Vertical (Oil & Gas, Power & Utility, Safety & Security), By Region, And Segment Forecasts, 2019 – 2025. (2019).
2. Соколов А.Н., Яцеев В.А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // LIGHTWAVE Russian Edution.- (2006) №4. 42с.
3. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика: теория и практика. Пер. с англ. - М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, (2006) 320 с.
4. Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи Учебное пособие для студентов, аспирантов, инженеров. — Москва: Эко-Трендз, (2002) 276 с.
5. Дональд Дж. Стерлинг, младший. Техническое руководство по волоконной оптике. — М.: Лори, (1998) 195 с.
6. Интерферометр Фабри-Перо. Московский физико-технический институт МФТИ Москва, (2005) 12 с.
7. Удд Э. (ред.) Волоконно-оптические датчики Вводный курс для инженеров и научных работников. – М.: Техносфера, (2008) 520 с.
8. Лопин А.В., Семпенов А.В., Пузиков В.М. Оптический датчик температуры на основе нанокристаллической пленки SiC. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. (2007) №4. сс.19-22.
9. Min Li, Yulin Li Fiber-optic temperature sensor based on interaction of temperature-dependent refractive index and absorption of germanium film // Applied optics. (2011), Vol. 50. No.2. PP.231-236.
10. Lytvyn P. M. Features of mechanical scanning probe lithography on graphene oxide and As(Ge)Se chalcogenide resist / P. M. Lytvyn, S. V. Malyuta, I. Z. Indutnyi, A. A. Efremov, O. V. Slobodyan, V. I. Min'ko, A. N. Nazarov, O. V. Borysov, I. V. Prokopenko // Semiconductor physics, quantum electronics & optoelectronics. 2018. Vol. 21, № 2. С. 152-159.

11. С.В. Варжель. Волоконные брэгговские решетки. Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, (2015) 65 с.
12. Yong Zhao., Min Rong., Yanbiao Liao. Fiber-optic temperature sensor used for oil well based on semiconductor optical absorption. IEEE Sensor Journal. (2003) V.3. No.4. PP.400-403.
13. Ding, Yuhua & Zhang, Tao. Low cost fiber-optic temperature measurement system for high voltage electrical power equipment. IEEE Transactions on instrumentation and measurement. (2010) V.59. PP. 923-933.
14. Sabrie Soloman. Temperature sensor in process control. Industrial sensor and control. The basics. Part II. (2011) p.5.
15. LEI Xiaomei. The Study of the Dual-wavelength Fiber-optic Temperature Sensor. Applied Mechanics and Materials. (2012) Vols. 128-129. PP.741-744.
16. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов В.Т., Чаморовский Ю.К. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы. Фотон-экспресс. (2005) №6. сс.114-127.
17. Fiber-Optic Temperature Measurement [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.omega.co.uk/technical-learning/fiber-optic-temperature-measurement.html> (дата звернения: 6.03.2021). Назва з екрану.
18. Low Cost OEM Fiber Optic Temperature Measurement Solution Debuts at SPIE Photonics West 2017 [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/january_2017/FOTEMP1.htm (дата звернения: 6.03.2021). Назва з екрану.
19. Wang, Tingyun & Luo, Chengmu. Fiber-optic semiconductor absorption temperature sensor for electrical power system applications. Conference Record. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 3. P. 2375-2379 Vol.3. (2004).
20. Junliang Zhao, Rongfeng Guan, and Hongtu Zhao. "GaAs optical fiber temperature sensor", Proc. SPIE VOLUME 4223, Instruments for Optics and Optoelectronic Inspection and Control, Pg. 87. (2000).

21. 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>.
22. Борисова З.У. ХИМИЯ стеклообразных полупроводников. - Ленинград: Из-во ЛГУ, (1972) 246 с.
23. Peter A. Lee. Optical and Electrical Properties Springer Science+Business Media B.V. (1976). Vol. 4. P. 464.
24. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. 7-е изд. М.: Госхимиздат, (1961) 831 с.
25. Masanaga KUNUGI., Rikuo OTA., Matsuo SUZUKI. Viscosity of Glasses in the System As-Se, As-Se-S, As-Se-Te and As-Se-Tl, Journal of the Society of Materials Science, Japan, 1970, Volume 19, Issue 197, Pages 145-150. Online ISSN 1880-7488, Print ISSN 0514-5163, (2009).
26. Model 110 Automatic Twin-Jet Electropolisher [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.fischione.com/products/conventional-specimen-preparation/model-110-automatic-twin-jet-electropolisher> (дата звернения: 6.03.2021). Назва з екрану.
27. Wagner T., Kasap S.A. Glass transformation, heat capacity and structure of As_xSe_{1-x} glasses studied by modulated temperature differential scanning calorimetry experiments. Phil. Mag. (1996) V. B74, No.6. P. 667-680.
28. Boolchand P., Georgiev D.G., Tao Qu et al. Nanoscale phase separation effects near $\bar{r}=2.4$ and 2.67, and rigidity transitions in chalcogenide glasses. C. R. Chimie. (2002). No5. P. 713-724.
29. Wagner T., Kasap S.O., Vlček M. et al. The structure of As_xS_{1-x} glasses studied by temperature modulated differential scanning calorimetry and Raman spectroscopy. J. Non-Cryst. Solids. (1998). V.227-230, Pt.2. – P. 752-756.
30. Boolchand P., Georgiev D.G., Goodman B. Discovery of the intermediate phase in chalcogenide glasses.// Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. (2001). V.3, No.3. P. 703-720.

31. Минаев В.С. Стеклообразные полупроводниковые сплавы. М.: Металлургия. (1991). 407 с.
32. Trunov, M.L., Lytvyn, P.M., Sterligov, V.A. *et al.* Formation of Nanostructures Upon Photoexcitation of Surface Plasmon Resonance in Nanocomposites Derived from Textured Gold Films and Chalcogenide Glass. *Theor Exp Chem* **54**, 107–113 (2018).
33. Свечников С.В., Химинец В.В., Довгошей Н.И. Сложные некристаллические халькогениды и халькогалогениды и их применение в опто- и микроэлектронике. – К.: Наукова думка, (1992). 294 с.
34. Andriesh, A., & Iovu, M. Optical properties of AsSe amorphous composites. Vol. 8, No. 6, (2006). p. 2080 – 2085.
35. Rubish V. M. Laser-induced changes in the optical characteristics of amorphous films of the As-Sb-S system / V. M. Rubish, M. M. Pop, O. A. Mykaylo, A. A. Kryuchyn, V. M. Maryan, M. O. Durkot, T. I. Yasinko, S. O. Kostyukevich, K. V. Kostyukevich // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія : Фізика. 2017. Вип. 42. С. 14 - 26.
36. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. Издательство. М.: Наука. (1977) 366 с.
37. Vaclavik, Jan & Vápenka, David. Gallium Phosphide as a material for visible and infrared optics. EPJ Web of Conferences 48, 00028 (2013). PP. 4.
38. Shpak, I. & Studenyak, Ihor & Kranjčec, M. Optical absorption edge and structural disorder in electron-irradiated As₂S₃ chalcogenide glasses. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 5. (2003). PP. 1135-1138.
39. Гиндин И.А., Чиркина I.А., Метоледи Э.Н. Оптические свойства и дефектная структура кристаллических тел. Обзор: М.: ЦНИИатоминформ, (1989). 28 с.
40. Low Cost OEM Fiber Optic Temperature Sensor Debuts at Sensors Expo 2017 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.fiercееlectronics.com/components/low-cost-oem-fiber-optic-temperature-sensor-debuts-at-sensors-expo-2017> (дата звернення: 6.03.2021). Назва з екрану.

41. Ga As technology overview [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://opsens-solutions.com/wp-content/uploads/sites/4/2015/04/IMP0119-GaAs-Technology-Overview-Rev1.0.pdf> (дата звернення: 6.03.2021). Назва з екрану.
42. TS Temperature Sensors [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://micronor.com/products/ts-temperature-sensors/> (дата звернення: 6.03.2021). Назва з екрану.
43. Sharon Walsh. Fiber Optic Temperature Sensors Applied to a Various Array of Transformers. (2006). Issue 3 • Volume 10.
44. Tingyun Wang and Chengmu Luo. Fiber-optic semiconductor absorption temperature sensor for electrical power system applications. Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Vol.3. (2004), pp. 2375-2379.
45. Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г., Физика полупроводников, М.: Наука, (1977). 672 с.
46. Немошкаленко В.В., Кучеренко Ю.Н. Методы вычислительной физики в теории твердого тела. К.: Наукова думка, (1986).294 с.
47. Мюллер Р.Л. Химия твердого тела и стеклообразное состояние./ Химия твердого тела, Л., (1985). С.9-63.
48. Немилов С.В. Взаимосвязь между скоростью распространения звука, массой и энергией химической взаимосвязи. Докл. АН СССР. (1968). Т.181. №6. С. 1427-1429.
49. Олексиук И.Д., Цитровский В.В., Туряница И.Д. Получение и свойства модуляционных материалов на основе некоторых халькогенидов. Квантовая электроника. (1977), Вып.13. С. 93-96.
50. Street R.A., Nemanich R.J., Connel G.A.N. Thermally induced effect in chalcogenide films. II. Optical absorption. Phys. Rev. B. (1978). V.18, No.12, P. 6915-6919.
51. Туряница І.І., Козусенок О.В., Чичура І.І. Чутливий елемент волоконно-оптичного датчика температури, його виготовлення і оптимізація

- характеристик. // Науковий вісник УжНУ, сер. Фізика. (2013). Вип. 33. СС.175-180.
52. Туряниця. І.І., Чичура І.І. Волоконно-оптичний датчик з чутливим елементом з халькогенідного скла. Матеріали ІІ Всеукр. Науко.-практ. Конф. Молодих вчених та студентів. (2012). Луцьк. сс. 294-296.
53. Chychura Ig. I., Turianytsia I. I., & Chychura Iv. I. Temperature dependence of the optical absorption edge of doped gallium arsenide. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(2), (2020). PP. 288-293.
54. Cody G.D. *Semiconductors and Semimetals. Vol 21* edited by J. I. Pankove. Academic Press, (1984). P. 440.
55. Beaudoin, M. *Appl. Phys. Lett.* **70**, 3540 (1997).
56. Uesugi, Katsuhiko. *Appl. Phys. Lett.* 76, 1285 (2000).
57. Бусурин В.И., Семенов А.С., Удалов И.П. Оптические и волоконно-оптические датчики. *Квантовая электроника*, 12, № 5, (1985). СС. 901-944.
58. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, (1990). 254 с.
59. T-Series TO-Can 9mm M9-SM-808nm-50mW [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.sheaumann.com/download/t-series-to-can-9mm-m9-sm-808nm-50mw/> (дата звернення: 6.03.2021). Назва з екрану.
60. OPT101 Datasheet (PDF) - Texas Instruments [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/545673/TI/OPT101.html> (дата звернення: 6.03.2021). Назва з екрану.
61. Оптический кабель [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://finmark.ua/catalog/optical-cable.html> (дата звернення: 6.03.2021). Назва з екрану.
62. Дэвид Бейли., Эдвин Райт. Волоконная оптика: теория и практика. Пер. с англ. М.: Кудиц-Пресс, (2008). -320 с.
63. Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть 1. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. – СПб: СПбГУИТМО, (2009). 244 с.

64. Постников В.С. Оптическое материаловедение: курс лекций. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, (2013). 280 с.
65. Турияниця І.І., Чичура І.І., Козусенок О.В., Вакула А.А. Аналіз термостабільності джерела випромінювання волоконно–оптичного перетворювача. ОДАТРЯ Збірник наукових праць (2016) сс. 175-176
66. 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, (2016). сс.188-189.
67. 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, (2017). С. 113 – 116.
68. Чичура І.І., Козусенок О.В., Турияниця 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, (2019). СС. 89– 90.
69. Турияниця 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, (2013) СС. 169.
70. 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, Iss. 1-2, pp. 48-53 (2019).
71. Петров В.В., Крючин А.А., Рубіш В.М., Костюкевич С.А., Шепелявий П.Є. Використання халькогенідних склоподібних напівпровідників для

- створення мікро-та нанорозмірних структур. Реєстрація, зберігання і обробка даних. Том. 22 № 2 (2020) с. 7-18.
72. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения, Политехника, (1991), 240с.
73. Boudebs, Georges & Cherukulappurath, Sudhir & Guignard, M. & Troles, Johann & Smektala, Frederic & Sanchez, François. Linear optical characterization of chalcogenide glasses. Optics Communications. (2004). PP.230.
74. Harbold, J.M. & Ilday, Fatih & Wise, Frank & Aitken, B.G. Highly nonlinear Ge-As-Se and Ge-As-S-Se glasses for all-optical switching. Photonics Technology Letters, IEEE. 14. (2002). PP. 822 - 824. 10.1109/LPT.2002.1003105.
75. Тарасов В.В. Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.:Университетская книга: Логос. (2007). 192 с.
76. Леко В.К., Мазурин О.В. Свойства кварцевого стекла. - Л.: Наука: Ленингр. отд-ние, (1985). 165 с.
77. 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, (2015) С.117-119.
78. Борисова З.У. Халькогенидные полупроводниковые стекла. З.У. Борисова. – Ленинград: Издательство Ленингр. ун-та, 1983 г. – 344 с.
79. Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела : пер. с нем. Москва: Мир, 1986. 558 с.
80. И.Д. Анисимова, И.М. Викулин, Ф. А. Заитов, Ш.Д. Курмашев. Полупроводниковые фотоприемники: Ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра. Под ред. В.И. Стафеева. М.: Радио и связь. (1984). 216 с.
81. Туряниця І.І., Чичура І.І., Бутурлакін О.П. Блок реєстрації волоконно-оптичного датчика температури. Зб. Тез доповідей XII Міжн. Наук.-техн.

- Конф. Приладобудування: стан і розвиток, перспективи».- Україна, Київ, НТУУ КПІ. (2013). СС. 170-171.
82. 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 (2013). СС.44-46.
83. Нефедов. А. В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник. Том 7. М.:ИП РадиоСофт, (1999). 640 с.
84. 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, (2014). СС. 60-61.

ДОДАТКИ

Додаток А

Порівняльна характеристика волоконно-оптичних технологій, які використовуються у вимірвальній техніці

Назва технології	Принципи дії	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
Фазова	На основі інтерферометрів Фабрі-Перо, Маха-Цандера, Майкельсоната на ґратках Бреґґа	Надзвичайно висока точність	<ul style="list-style-type: none">- необхідність джерела когерентного випромінювання- чутливість до флуктуацій вхідного випромінювання,- можливість тільки відносних вимірювань,- необхідність використання фазокомпенсуючих елементів,- складність в виготовленні.
Амплітудна	Зміна поглинання ЧЕ	<ul style="list-style-type: none">- простота виготовлення,- мала вартість	<ul style="list-style-type: none">- Чутливість до флуктуацій вхідного випромінювання,- можливість тільки відносних вимірювань, - середня точність.

Продовження додатку А

1	2	3	4
Тунельна	Тунелювання світла через малу щілину	Надзвичайна висока чутливість	<ul style="list-style-type: none"> - Малий діапазон вимірювань, - необхідність точного юстування, - чутливість до флуктуацій вхідного випромінювання, - можливість тільки відносних вимірювань
Поляризаційна	Зміна стану поляризації	Висока точність	Необхідність використання дорогого волокна зі збереженням поляризації.
Спектральне кодування	На основі ґратки Брегга всередині волокна	<ul style="list-style-type: none"> - Можливість мультиплексування великого числа каналів, - можливість вимірювання абсолютних величин. 	<ul style="list-style-type: none"> - Середня точність, - складна система обробки сигналів.
	На основі інтерферометра Фабрі-Перо, ,	<ul style="list-style-type: none"> - Висока точність, - забезпечення абсолютних вимірювань, - нечутливість до флуктуацій вхідного випромінювання, - нема необхідності в багатократному юстуванні. 	Дуже складна система обробки оптичного сигналу.

Продовження додатку А

1	2	3	4
	На основі інтерферометра Маха-Цандера, Майкельсона	- сумісність з технологіями інтегральної оптики, - прості в виробництві - достатньо дешеві.	- Середня точність, - складна система обробки сигналів,- труднощі зі стиковкою з оптоволокном при використанні технологій інтегральної оптики.

Класифікація та характеристики ВОДТ

Тип датчика	Принцип роботи	Фізична величина, що модулюється	Лінія передачі випромінювання	Параметри та особливості вимірювань
Прохідного типу	Зміна поглинання	Інтенсивність випромінювання	Багатомодове волокно	Діапазон: від -10°C до $+300^{\circ}\text{C}$. Точність: $< 1^{\circ}\text{C}$
Прохідного типу	Зміна люмінесценції	Інтенсивність випромінювання	Багатомодове волокно	Діапазон: від 0°C ... до $+75^{\circ}\text{C}$ Точність: $< 0,05^{\circ}\text{C}$
Прохідного типу	Переривання оптичного шляху	Інтенсивність випромінювання	Багатомодове волокно	Режим вкл/викл
Антенного типу	ІЧ-випромінювання	Інтенсивність випромінювання	Інфрачервоне	Діапазон до: $250\dots 1200^{\circ}\text{C}$ Точність: $\pm 1\%$
Інтерферометр Фабрі-Перо	Теплове стиснення та розширення	Фаза світлової хвилі (інтерференція)	Чутливий елемент – одномодове волокно	Висока чутливість
Послідовного та паралельного типу	Зворотне розсіювання Релея	Інтенсивність зворотного розсіювання Релея	Чутливий елемент- багатомодове волокно	Велика кількість точок вимірювання в одному пристрої

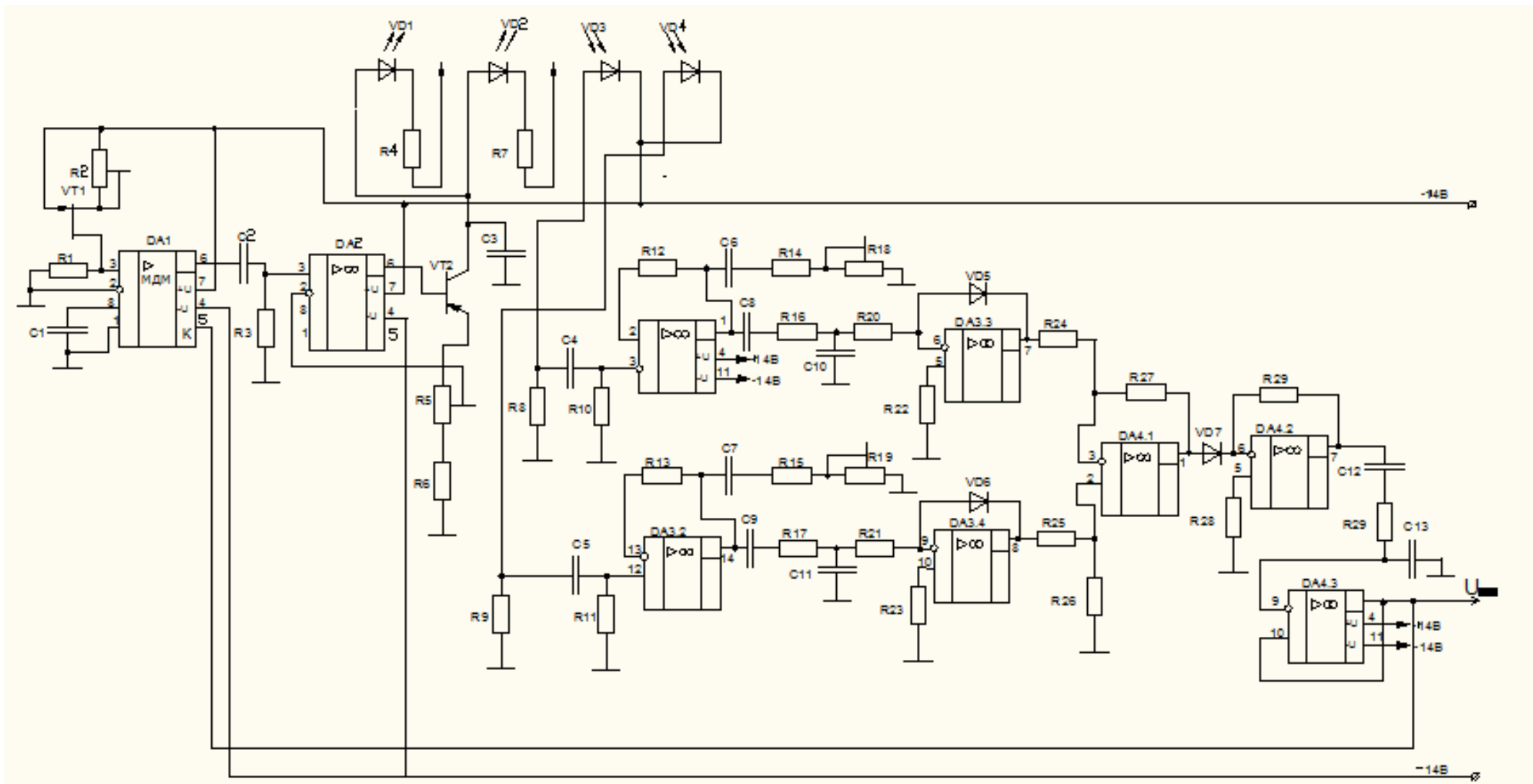


Рис. 1 Електрична принципова схема оптоелектронного реєстратора для дослідження різних оптичних схем ВОДТ