

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма "Радіоелектронні апарати та засоби"
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри ПЕЕА
Хорошайло Ю.Є. _____
(підпис)

« _____ » _____ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Студентові Якименко Олександр Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження геометричних та електричних властивостей філаменту для 3D-друку

затверджена наказом по університету від 14.11 2022 р. № 1475 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 02 грудня 20 р.

3. Вихідні дані до роботи Дослідити теплофізичні методи контролю геометричних розмірів та контролю дефектів діелектричних матеріалів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Дослідження властивостей філаменту.

4.2 Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень

4.3 Дослідження приладів та програмного забезпечення терагерцової спектроскопії

4.4 Проведення експерименту

4.5 Охорона праці

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації наведеній в додатку А

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання	01.09.22– 03.09.22	виконано
2	Пошук літератури	04.09.22– 10.09.22	виконано
3	Дослідження геометричних властивостей філаменту	11.09.22– 15.09.22	виконано
4	Дослідження фізичних властивостей філаменту	16.09.22– 25.09.22	виконано
5	Розробка основних теоретичних закономірностей	26.09.22– 10.10.22	виконано
6	Дослідження приладів та програмного забезпечення	11.10.22– 20.10.22	виконано
7	Проведення експерименту	21.10.22– 03.11.22	виконано
8	Виконання розділу «Охорона праці»	04.11.22– 06.11.22	виконано
9	Висновки	07.11.22– 09.11.22	виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	10.11.22– 25.11.22	виконано
11	Розробка презентації	26.11.22– 29.11.22	виконано

Дата видачі завдання _____ 2022 р.

Студент _____ Якименко О.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ проф Черняков Е.І.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Матеріали кваліфікаційної роботи включають: 115 аркушів, 46 рисунків, 13 таблиць, 1 додаток і 24 джерела.

3D ДРУК, ФІЛАМЕНТ, ДІАМЕТР, ДИФРАКЦІЯ, РОЗВ'ЯЗОК ХВИЛЬОВОГО РІВНЯННЯ, ГРАНИЧНІ УМОВИ, ІНДИКАТРИСА РОЗСІЮВАННЯ

Об'єкт дослідження – геометричні та фізичні властивості філаменту 3D-друку.

Метою дослідження є дослідження та аналіз властивостей філаменту та засобів для виконання цієї задачі.

Предметом дослідження в даній роботі є процес взаємодії випромінювання з ниткою, дифракція плоскої хвилі на нитці (філаментові) і дифракційній картині, визначення геометричних розмірів філаменту та її дефектів за дифрактограмою.

Як математичний опис використовується хвильове рівняння з граничними умовами. Розв'язок хвильового рівняння дозволяє знайти напруженість поля, а через напруженість поля – індикатрису розсіювання. Індикатриса розсіювання показує, як розподіляється інтенсивність відбитої хвилі в просторі навколо опроміненого циліндра з філаментом. Відстань між двома мінімумами на індикатрисі дозволяє знайти діаметр нитки. Якщо нитка опромінюється двома джерелами, то можна визначити форму нитки, тобто зовнішні дефекти.

Якщо аналізували двошарову нитку, то за асиметрією її індикатриси можна судити про те, чи є два шари нитки співвісними чи ні. Це стане в нагоді в майбутньому для виявлення внутрішніх дефектів нитки.

ABSTRACT

The materials of the qualification work include: 115 sheets, 46 figures, 13 tables 1 addition, and 24 sources.

3D PRINTING, FILAMENT, DIAMETER, DIFFRACTION, SOLUTION OF THE WAVE EQUATION, BOUNDARY CONDITIONS, SCATTERING INDICATOR

The object of research is geometric and physical properties of 3D printing filament.

The purpose of the study is to study and analyze the properties of the filament and the means to accomplish this task.

The subject of research in this work is the process of radiation interaction with the filament, diffraction of a plane wave on the filament and the diffraction pattern, determination of the geometric dimensions of the filament and its defects according to the diffractogram.

A wave equation with boundary conditions is used as a mathematical description. Solving the wave equation makes it possible to find the field strength, and due to the field strength, the scattering indicatrix. The scattering indicator shows how the intensity of the reflected wave is distributed in the space around the irradiating cylinder with the filament. The distance between the two minimums on the indicator allows you to find the diameter of the thread. If the thread is irradiated by two sources, it is possible to determine the shape of the thread, that is, external defects.

If a two-layer thread was analyzed, then by the asymmetry of its indicatrix, one can judge whether the two layers of the thread are coaxial or not. This will be useful in the future for detecting internal defects of the thread .

РЕФЕРАТ

Материалы квалификационной работы включают: 115 листов, 46 рисунков, 13 таблиц 1 приложение и 24 источника.

3D ПЕЧАТЬ, ФИЛАМЕНТ, ДИАМЕТР, ДИФРАКЦИЯ, РЕШЕНИЕ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ, ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ, ИНДИКАТРИСА РАССЕЯНИЯ

Объект исследования – геометрические и физические свойства филамента 3D-печати.

Целью исследования является исследование и анализ свойств филамента и средств выполнения этой задачи.

Предметом исследования в данной работе является процесс взаимодействия излучения с нитью, дифракция плоской волны на ните (филаменте) и дифракционной картине; определение геометрических размеров филамента и ее дефектов по дифрактограмме.

В качестве математического описания используется волновое уравнение с предельными условиями. Решение волнового уравнения позволяет найти напряженность поля, а из-за напряженности поля – индикатриса рассеяния. Индикатриса рассеяния показывает, как распределяется интенсивность отраженной волны в пространстве вокруг облученного цилиндра с филаментом. Расстояние между двумя минимумами на индикатрисе позволяет найти диаметр нити. Если нить облучается двумя источниками, можно определить форму нити, то есть внешние дефекты.

Если анализировали двухслойную нить, то по асимметрии ее индикатрисы можно судить о том, есть два слоя нити соосными или нет. Это пригодится в будущем для выявления внутренних дефектов нити

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів.....	10
Вступ.....	11
1.Огляд за літературними джерелами стану питання дослідження, виявлення теоретичних передумов та можливих напрямків вирішення задач розробки.....	13
1.1 Дослідження властивостей філаменту. Огляд і аналіз матеріалів 3D-друку.....	13
1.1.1 Поліактид (PLA).....	14
1.1.2 Акрилонітрілбутадієнстірол (ABS).....	18
1.1.3 Нейлон.....	21
1.1.4 Полікарбонат.....	24
1.1.5 Поліетилен високої щільності.....	27
1.2 Огляд методів вимірювання геометричних і фізичних властивостей.....	29
1.2.1 Огляд методів дослідження геометричних властивостей філамент.....	29
1.2.1.1 Пневматичний метод.....	30
1.2.1.2 Ультразвуковий метод.....	30
1.2.1.3 Оптичні методи.....	31
1.2.1.3.1 Метод вимірювання потужності потоку випромінювання.....	31
1.2.1.3.2 Метод вимірювання скануванням.....	32
1.2.1.3.3 Тіньовий метод в квазіпаралельному пучку.....	34
1.2.1.3.4 Дифракційний метод.....	35
1.2.1.4 Аналіз та вибір методу дослідження геометричних властивостей філаменту.....	36
1.2.2 Огляд методів дослідження фізичних властивостей філаменту.....	37
1.2.2.1 Теплові (інфрачервоні) методи.....	37
1.2.2.2 Терагерцова спектроскопія та іміджинг.....	41
1.2.2.3 Аналіз та вибір методу дослідження фізичних властивостей філаменту.....	43

2. Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень.....	44
2.1 Модель і метод визначення геометричних властивостей (діаметра) дифракційним методом.....	44
2.1.1 Дифракції плоскої хвилі на круглому металевому однорідному діелектричному циліндрі.....	44
2.1.2 Діаметр волокна через індикатрису розсіювання.....	47
2.1.3 Визначення форми волокна	50
2.1.4 Бічні розміри зразків.....	51
2.1.5 Підбиття підсумків.....	53
2.2 Визначення фізичних властивосте (коефіцієнта заломлення) методом терагерцової спектроскопії в часовій області.....	53
2.2.1 Особливості терагерцового діапазону.....	53
2.2.2 Принцип дії... терагерцових спектрометрів в часовій області	55
2.2.2.1 Електрооптичне стробування.....	56
2.2.3 Основні співвідношення.....	57
2.2.3.1 Зображення за часом прольоту.....	58
2.2.3.2 Визначення коефіцієнта заломлення зразка за ефектом Фабрі Перро.....	59
Висновки до розділу 2.....	64
3. Дослідження приладів та програмного забезпечення терагерцової спектроскопії, проведення експерименту, опис експериментальної установки.....	65
3.1 Прилади та програмне забезпечення, які випускаються фірмами.....	65
3.1.1 Компанія Torica Photonics AG.....	66
3.1.2 Компанія ВАТОР optoelectronics.....	72
3.1.3 Компанія Hübner Photonics.....	77
3.1.4 Програмне забезпечення TeraLyzer компанії MenloSystem	80
3.2 Експеримент з використанням дифракційного методу для визначення діаметру.....	83
3.2.1 Джерело випромінювання	84
3.2.2 Оптична система	84

3.2.3 Багатоелементний приймач.....	86
3.2.4.1 Експериментальні дослідження.....	87
3.2.4.1 Технічна реалізація	88
3.3 Висновки до розділу 3.....	92
4. Охорона праці.....	94
4.1 Аналіз умов праці.....	94
4.2 Виробнича санітарія.....	94
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	100
Висновки	101
Список джерел та посилань.....	103
ДОДАТОК А ПРЕЗЕНТАЦІЯ.....	106

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НК – неруйнівний контроль

ABS – акрилонітрілбутадієнстірол

PLA – полілактид

NDT&E – Nondestructive testing and evaluation

IRT – інфрачервона термографія

THz-TDS – терагерцова спектроскопія у часовій області

ВСТУП

3D-друк – це адитивна технологія виробництва, яка використовується для виготовлення тривимірних деталей з нитки для друку. Якість деталі визначається багатьма факторами, і якість нитки – один з них. Звідси підвищена увага до контролю якості нитки, що полягає у вимірюванні її фізичних і геометричних параметрів на всіх етапах виготовлення як самої нитки, так і деталей з неї. До фізичних параметрів в першу чергу відноситься показник заломлення, а до геометричних – діаметр циліндричної нитки. Предметом дослідження в даній роботі є процес взаємодії випромінювання з ниткою розжарення, дифракція на нитці розжарювання та дифрактограмне, визначення геометричних розмірів нитки розжарювання та її дефектів на основі дифракційних картин. Для виготовлення нитки використовуються ABS і PLA пластики. З точки зору матеріалознавства – це діелектрики; з точки зору електродинаміки такі матеріали прозорі для випромінювання. Сусідніми діапазонами в спектрі довжин хвиль є оптичний, терагерцовий і мікрохвильовий. Терагерцовий діапазон був обраний через сумірність дефектів нитки з довжиною хвилі. Це означає, що буде розсіпання на дефекти. Як математичний опис використовується хвильове рівняння з граничними умовами. Рішення хвильового рівняння дозволяє знайти напруженість поля, а вже через напруженість поля індикатрису розсіювання. Індикатриса розсіювання показує, як інтенсивність відбитої хвилі розподіляється в просторі навколо опромінюючого філаментового циліндра. Відстань між двома мінімумами на індикатрисі дозволяє знайти діаметр нитки[2].

На основі розв'язання задачі про дифракцію електромагнітної хвилі на прозорому волокні круглого перерізу авторами отримано вирази, що зв'язують положення перших дифракційних мінімумів і діаметр волокна. Ці рівняння були використані для визначення діаметра волокна.

При вирішенні наукових, технічних, біологічних і медичних задач, при математичному моделюванні процесів взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною необхідно знати фізичні параметри об'єкта

дослідження. Великі можливості для цього з'явилися після розвитку комп'ютерних методів моделювання та обробки експериментальних даних. У роботах розглядаються комп'ютерні методи обробки зображень природних тонких волокон для вимірювання їх діаметра, визначення оптичних параметрів, таких як спектр поглинання, показник заломлення, показник ослаблення. Для колориметричного аналізу кольорових зображень використовувалися можливості математичних комп'ютерних програм.

1. ОГЛЯД ЗА ЛІТЕРАТУРНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ СТАНУ ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИЯВЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ТА МОЖЛИВИХ НАПРЯМКІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ РОЗРОБКИ

1.1 Дослідження властивостей філаменту. Огляд і аналіз матеріалів 3D-друку

3D-друк – методика виготовлення об'ємних виробів на основі цифрових моделей. Незалежно від конкретної технології, суть процесу полягає в поступовому пошаровому відтворенні об'єктів за допомогою матеріалу (філаменту).

Для відтворення різних об'єктів використовуються різні технології 3D-друку які відрізняються, як застосовуваними витратними матеріалами, так і швидкістю та точністю друку.

Основні технології 3D-друку:

– моделювання методом наплавлення (Fused deposition modeling, FDM) – одна з найпоширеніших технологій 3D-друку, застосовується в більшості настільних 3D-принтерів і являє собою ідеальне співвідношення ціна / якість. Друк відбувається за допомогою пошарової подачі нитки розплавленого пластику;

– стереолітографія (Laser stereolithography, SLA) – формування об'єкта за рахунок пошарового засвічування лазером рідкої фотополімерної смоли, яка твердіє під впливом випромінювання;

– селективне лазерне спікання (Selective laser sintering, SLS) – відтворення виконується за рахунок пошарового плавлення спеціального порошку під дією лазерного випромінювання. Цей метод 3D-друку широко застосовується в промисловості для виготовлення міцних металевих елементів.

У процесі 3D-друку застосовується спеціальний електронний пристрій – 3D-принтер, який друкує певними видами філаментів.

Філамент – нитка для 3D-друку є термопластичною сировиною для 3D-принтерів для моделювання плавленого осадження. Існує багато видів нитки з різними властивостями.

Сучасний 3D-принтер дозволяє використовувати різні матеріали серед яких найпопулярнішими 3D-філаментами зараз є термопласти, які також називають просто пластиками.

Типи 3D-пластиків:

- полілактид (PLA) – біорозкладається, легко друкується, часто використовується для створення споживчих товарів;
- акрилонітрілбутадієнстірол (ABS-пластик) – ударостійкий, міцний, з нього друкують корпуси та функціональні деталі;
- нейлон – міцний, гнучкий, універсальний у застосуванні скрізь, де потрібна гнучкість;
- полікарбонат – термопластик використовується в якості міцного заміника звичайного скла а також знайшов застосування в якості матеріалу для виготовлення компакт-дисків, контактних лінз, захисного спорядження;
- поліетилен високої щільності – найбільш поширений пластик в світі.

Найчастіше використовуються два типа філаментів – PLA і ABS. Розмір нитки також важливий. Існує два основних розміри нитки: 1,75 мм та 3 мм. Деякі 3D-принтери підтримують обидва розміри.

Розглянемо філаменти приведені вище більш детально.

1.1.1 Полілактид (PLA)

Полілактид – відноситься до найбільш використовуваних термопластиків. На це вказує декілька факторів.

PLA відомий своєю екологічністю, є біорозкладним, біосумісним, термопластичним аліфатичним полієфіром. Полілактид виготовляється здебільшого з цукрового очерету або кукурудзи, а також з кукурудзяний крохмаль, картопляний крохмаль, целюлоза, соєвий білок. [3].

PLA активно використовується в якості матеріалу для друку на 3D-принтерах. Натуральність PLA-пластика дозволяє без загрози для здоров'я людини використовувати його для різних задач.

При виготовленні PLA -пластика значно скорочуються викиди вуглекислого газу в атмосферу в порівнянні з виготовленням «нафтових» полімерів. На третину зменшується використання викопних ресурсів, застосування розчинних речовин не потрібно взагалі. Натуральність цього пластику приводить до його недовговічності. PLA-пластик має водопоглинальну властивість і м'яку структуру, Через це моделі надруковані з за допомогою цього пластику погано підходить для використання в функціональних цілях та підходить в якості фігурок, іграшкових моделей та створення дизайнерських виробів. В деяких випадках можна використовувати для створення для різноманітних контейнерів, харчових пакетів, обшивки панелей для електричних виробів, в механічних виробках де немає необхідності в витримуванні механічних навантажень та тому подібне. За часту, PLA-пластик продається у вигляді тонкої нитки, яка намотана на катушку, зображеної на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Катушка PLA-пластику

Температура плавлення пластику 180°C, що є одним з найважливіших факторів для його використання в 3D-друку та сприяє відносно низькій витраті електроенергії і використання недорогих сопел.

Як правило, екструзія проводиться при 160 °C – 170 °C.

У той же час, філамент повільно застигає (склування близько 50 °C), що слід враховувати при виборі 3D-принтера. Оптимальним варіантом є пристрій з корпусом відкритого типу, що підігрівається робочою платформою (щоб уникнути деформацій моделей великого розміру) і, бажано, додатковими вентиляторами для охолодження свіжих шарів моделі.

PLA має низьку усадку, тобто втрати обсягу при охолодженні, що сприяє запобіганню деформацій. Проте, усадка має кумулятивний ефект при збільшенні габаритів друкованих моделей.

Технічні характеристики PLA-пластику наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики PLA-пластика

Характеристика	Значення
Температура плавлення	171–178 °C
Температура розм'якшення	50 °C
Твердість (по Роквеллу)	R70–R90
Відносне подовження при розриві	3,8 %
Міцність на вигин	55,3 МПа
Міцність на розрив	57,8 МПа
Модуль пружності при розтягуванні	3,3 ГПа
Модуль пружності при згинанні	2,3 ГПа

Продовження таблиці 1.1– Технічні характеристики PLA-пластика

Температура склування	60–65 °С
Щільність	1,23–1,25 г/см ³
Мінімальна товщина стінок	1 мм
Точність друку	± 0,1 %
Вологопоглинання	0,5–50 %
Розмір найдрібніших деталей	0,3 мм
Усадка при виготовленні виробів	немає

Вироби з PLA-пластика піддають шліфуванню й свердлінню, фарбують акрилом. Однак варто пам'ятати, що предмет з PLA є дуже крихтливим і тому його потрібно обробляти з обережністю.

Ще одним мінусом PLA-пластика є його недовговічність: матеріал служить від декількох місяців до декількох років.

Переваги PLA-пластика:

- нетоксичний;
- широка палітра кольорів;
- при друку немає необхідності в нагрітій платформі;
- розміри стабільні;
- ідеальний для рухомих частин і механічних моделей;
- відмінне ковзання деталей;
- економія енерговитрат через низьку температури розм'якшення нитки;
- немає необхідності застосовувати каптон для змазування поверхні для нарощування прототипу;
- гладкість поверхні надрукованого виробу;
- отримання більш детальних і повністю готових до застосування об'єктів.

Недоліки:

- не рекомендується використання там де необхідна витримка механічного навантаження;
- не можна використовувати в довгостроковій ініціативі;
- високе водопоглинання.

PLA-пластик є ідеальним матеріалом для 3D-друку прототипів і виробів, які не передбачається експлуатувати тривалий час. Це можуть бути декоративні об'єкти, вироби для презентацій і предмети, що вимагають ретельної деталізації.

1.1.2 Акрилонітрілбутадієнстірол (ABS)

Акрилонітрілбутадієнстірол (ABS) – ударостійкий термопластик, який завоював високу популярність в промисловості і в аддитивному виробництві. Відмінні механічні та фізичні властивості ABS-пластика обумовлюють можливість застосування цього матеріалу для створення об'єктів, що мають практичну цінність. ABS-пластик широко застосовується в автомобільній, медичній та сувенірній промисловості, у виробництві спортивного інвентарю, сантехніки, банківських карт, меблів, іграшок та ін. Висока міцність ABS-пластику дозволяє використання у виробництві несучих елементів.

ABS-пластик став дуже популярним в зв'язку з легкістю використання філаменту та невисокою ціною ABS-пластик є одним з найбільш популярних матеріалів для друку методом FDM.

ABS-пластик відносно безпечний і не надає загрози в нормальних умовах. Проте, нагрівання ABS призводить до виділення токсичних парів акрилонітрилу, що означає необхідність елементарних запобіжних заходів. Обсяг випаровувань, як правило, невеликий зважаючи на відносно повільні витрати матеріалу при FDM-друку. Для забезпечення повністю безпечних умов потрібна лише хороша вентиляція приміщення або витяжка. Варто також мати на увазі, що ABS-пластик вступає в реакцію з етанолом, що призводить до виділення стиролу.

У таблиці 1.2 наведено технічні характеристики пластику.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики ABS-пластику

Характеристика	Значення
Температура склування	105 °С
Міцність на вигин	41 МПа
Межа міцності на розрив	22 МПа
Модуль пружності при розтягуванні	1627 МПа
Відносне подовження	6 %
Усадка при охолодженні	до 0,8 %
Щільність матеріалу близько	1,05 г/см ³

Параметри пластику залежать від специфікації виробництва в залежності від розробника. ABS може перемішуватися з іншими видами термопластиків (наприклад полістирол) через, що може призвести до зміни температури екструзії, стійкості до певних розчинників.

Прикладом друку та використанні кольорового спектру можна привести дитячий конструктор Lego. На рисунку 1.2 зображено гранули даного філаменту для використання при 3D-друку.

Недоліки ABS-пластика:

- низька стійкість до прямого впливу сонячного світла;
- потенційна токсичність матеріалу обмежує застосування у виробництві іграшок, харчової тари і медичних інструментів.

Переваги ABS-пластика:

- практично необмежена колірна гамма;
- вологостійкість;
- кислотостійкість;
- маслостійкість;

- відносно висока теплостійкість, що досягає 115 °С у деяких марок матеріалу;
- нетоксичність при відносно низьких температурах і при відсутності впливу – алкоголю;
- підвищена ударостійкість;
- висока еластичність;
- висока довговічність за відсутності прямого сонячного світла;
- легко піддається механічній обробці;
- хороша цінова доступність;
- висока розчинність в ацетоні.



Рисунок 1.2 – Гранули ABS-пластику

Друк ABS-пластиком пов'язаний з певними технологічними труднощами, зважаючи на досить високу схильність до усадки, тобто до втрати обсягу при охолодженні. Як наслідок, можливе утворення деформацій і розшарування моделей. Через це виробники 3D-принтерів оптимізують їх для друку враховуючи особливості друку за допомогою ABS-пластику за рахунок установки підігрівальних робочих платформ і забезпечення в тій чи іншій мірі кліматичного контролю в робочій камері.

Крім можливості механічної обробки, ABS добре розчиняється в ацетоні і в других розчинниках, що дозволяє виробляти досить великогабаритні моделі із складових частин шляхом склеювання. Крім того можливе досягнення максимальної герметичності за допомогою обробки парами ацетону виготовлених моделей та з'являється можливість згладжування зовнішніх поверхонь.

1.1.3 Нейлон

Даний вид філаменту має такі якості:

- висока зносостійкість;
- низький коефіцієнт тертя.

Використовується нейлон для покриття деталей, які в процесі роботи виконують тертя для підвищення експлуатаційної якості та використання таких деталей без їх попереднього змащення. Використання цього типу пластику в промисловості призвело до великої зацікавленості його експлуатації в сферах адитивного виробництва.

В перші дні використання нейлону в промисловості його було взято на використання в друку для виробництва.

Використання філаменту досить обмежена, незважаючи на його широке використання в промисловості, що пов'язано з технологічними труднощами в його використанні.

Проте, останнім часом з'являються спеціалізовані витратні матеріали з нейлону, орієнтовані на використання з SLS і FDM-принтерами.

Найбільш популярними прикладами служать нейлонові нитки виробництва компанії Taulman і Stratasys. Stratasys Nylon 12 призначений для використання з фірмовими професійними установками Fortus 360 mc, 400 mc і 900 mc, в той час як нейлонові нитки марки Taulman розраховані на застосування з будь-якими побутовими та офісними 3D-принтерами, оптимізованими для роботи з популярним.

Крім того, компанія Taulman випускає ряд нейлонових матеріалів, призначених для друку за технологією лазерного спікання, включаючи порошкову версію Taulman 618.

У таблиці 1.3 надано основні технічні характеристики нейлону.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики нейлону

	Taulman 618	Taulman 645	Stratasys Nylon 12
Густина	1,134 г/см ³	–	–
Гігроскопічність	3,09 %	3,09 %	–
Міцність на розрив	65,99 МПа	85,68 МПа	48,26–53 МПа
Відносне подовження при розриві	Понад 300 %	Понад 300 %	9,5–30 %
Температура плавлення	218 °С	214 °С	178 °С
Температура склування	49,4 °С	68,2 °С	–
Температура екструзії	235–260 °С	235–260 °С	–
Температура піролізу	350–360 °С	350–360 °С	–
Температура друку	280–300 °С	296–320 °С	–

Переваги:

- висока зносостійкість;
- висока еластичність;
- стійкість до більшості розчинників на органічній основі;
- висока термостійкість;
- з легкістю піддається механічній обробці.

Недоліки:

- висока гігроскопічність;
- виділення токсичних парів при піролізі;
- нейлонові нитки марки Taulman доступні в діаметрі 1,75 мм і 3 мм.

Технологію друку нейлона можна порівняти з друком ABS-пластиком про вони мають деякі відмінності. Обидва філоменти схильні до скручування та деформації при нерівномірному охолодженні, що змушує використовувати технології для підігріву платформи та контролю температури (температурні кожухи для 3D-принтерів і тому подібне).

Шари нейлону прекрасно схоплюються, що мінімізує ймовірність розшарування моделей. Користувачі пластиків Taulman відзначають міцність моделей на рівні аналогів, виготовлених традиційним методом лиття під тиском. На рисунку 1.3 зображено деталі виготовлені із пластику нейлона компанії Taulman.

Ще одна складність при роботі з нейлоном в його складності склеювання з іншими частинами друку, що унеможлиблює виготовлення великогабаритних деталей. Для вирішення цієї проблеми можливо з'єднання нейлонових деталей за допомогою плавки з'єднуваних поверхонь.

Використовуючи різноманітні барвники на кислотній основі стає можливим фарбування надрукованих моделей даного філаменту, що може сприяти довшій експлуатації.

В зв'язку з неможливістю нейлона схоплюватися зі склом та іншими гладкими поверхнями рекомендується під час друку наносити малярну клейку стрічку або використовувати підкладку з деревини.

Беручи до уваги високу гігроскопічність нейлону(здатність вбирати вологу) необхідна просушка нейлових ниток перед виконанням 3D-друку для запобігання виділення водяної пари з сопла, що не є катастрофічним для екструдера, але може погіршити якість друку.



Рисунок 1.3 – Деталі надруковані із нейлону

1.1.4 Полікарбонат

Полікарбонат – термопластик, в стільниковому вигляді широко використовується в якості міцного замітника звичайного скла. Крім того, полікарбонат знайшов застосування в якості матеріалу для виготовлення компакт-дисків, контактних лінз, захисного спорядження (наприклад, велосипедних шоломів або окулярів). Комбінація прозорості полікарбонату і високої міцності (близько 250

разів вище, ніж у звичайного скла), дозволяє виготовляти навіть куленепробивне скло.

Також до переваг полікарбонату можна віднести високу стійкість до високих та низьких температур, які лежать в діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Також пластик має схильність до загасання при впливі на нього відкритого вогню, сприяючи пожежній безпеці та має стійкість до впливу кислот. На рисунку 1.4 зображено деталь виготовлену з полікарбонату.



Рисунок 1.4 – Деталь виготовлена з полікарбонату

До недоліків полікарбонату можна віднести досить високу гігроскопічність (здатність матеріалу поглинати водяні пари з повітря в результаті абсорбації). Котушки з ниткою рекомендується зберігати в сухих місцях, а бажано у вакуумній упаковці. Крім того, полікарбонат вразливий до ультрафіолетового світла, що

згодом призводить до втрати міцності, і вразливий до впливу нафтопродуктів і органічних розчинників.

Полікарбонат вимагає досить високої температури екструзії, що перевищує 300 °С при друку на високій швидкості. Зважаючи на високу гігроскопічність, безпосередньо перед друком може знадобитися просушка витратного матеріалу. Для цього рекомендується витримати нитку протягом 10 годин при температурі 70 °С.

В іншому випадку можливе виділення водяної пари при екструзії, замутнення матеріалу і підвищення усадки, що підвищує ризик деформацій.

Навіть просушений полікарбонат потребує використання робочого столика з підігрівом від 90 °С до 120 °С.

Рекомендується використовувати мідну плівку (каптон) для кращого зчеплення першого шару з поверхнею робочого столика.

В таблиці 1.4 наведено технічні властивості полікарбонату для 3D-друку.

Таблиця 1.4 – Технічні властивості полікарбонату для 3D-друку.

Парметри друку	Значення
Температура друку	260 – 285 °С
Температура платформи	90 – 120 °С
Обдув	без обдува
Швидкість друку	30 – 60 мм/с
Усадка при охолодженні	0,5 – 0,7 %
Діаметр нитки, мм	1.75/3.00 +/-0.05
Овальність, мм	+/-0.03
Щільність, кг/м ³	1200
Точка плавлення, °С	250

Продовження таблиці 1.4 – Технічні властивості полікарбонату для 3D-друку.

Лінійна маса, м/кг (довжина 1 кг мононитки)	370
Стійкість до вигину, рази	50
Технологія друку	FDM
Діаметр пластика	1,75 мм

1.1.5 Поліетилен високої щільності

Поліетилен високої щільності це найбільш поширений пластик, його використання є відносно рідкісним серед 3D-друкованих матеріалів. Причиною цьому є складності пошарового виготовлення моделей.

Температура плавлення поліетилену складає 130 °C – 145 °C та швидко застигає при температурі 100 °C – 120 °C, в результаті чого нанесені шари не встигають схоплюватися. Крім того, поліетилен відрізняється високою усадкою, що провокує закрутку перших шарів і деформацію моделей в цілому при нерівномірному застиганні. Друк поліетиленом вимагає використання підігріву платформи і робочої камери з акуратним регулюванням температурного режиму для уповільнення охолодження нанесених шарів. Крім того, є необхідність проводити друк на високій швидкості.

У таблиці 1.5 наведено технічні характеристики поліетилену високої щільності.

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики поліетилену високої щільності.

Характеристика	Значення
Температура плавлення	123 °C – 145 °C
Температура силування	100 °C – 120 °C

Щільність	0,95 г/см ³ – 0,96 г/см ³
-----------	---

Продовження таблиці 1.5 – Технічні характеристики поліетилену високої щільності

Кристалічність	Висока
Розчинність	розчинний в вуглеводнях тільки при температурах вище 120 °С

На рисунку 1.5 зображені гранули поліетилену високої щільності.



Рисунок 1.5 – Гранули поліетилену високої щільності

Труднощі у використанні компенсуються дешевизною і загальнодоступністю цього матеріалу. Останнім часом були розроблені кілька пристроїв для переробки пластикових відходів з ПНД (пляшок, харчової упаковки та ін.) В стандартні нитки

для друку на FDM/FFF принтерах. Прикладами служать FilaBot і RecycleBot. За рахунок простоти конструкції, пристрої RecycleBot часто збираються силами 3D-умільців.

При плавленні поліетилену відбувається емісія парів шкідливих речовин, тому рекомендується проводити друк в добре вентильованих приміщеннях.

1.2 Огляд методів вимірювання геометричних і фізичних властивостей

При виготовленні продовгуватих виробів циліндричної форми потребується постійний безперервний контроль фізичних та геометричних параметрів.

1.2.1 Огляд методів дослідження геометричних властивостей філаменту

Основним геометричним параметром філаменту являється його діаметр. Всі способи вимірювання розміру діаметра можна поділити на два типи:

- контактні;
- безконтактні.

Контактні методи мають ряд недоліків таких, як: незручність встановлення приладу для виміру та велика похибка при вимірюванні.

Безконтактні методи бувають:

- прямими;
- непрямыми.

При прямих методах вимірювання діаметра порівнюють з розмірами шкали або довжиною хвилі.

При непрямих методах вимірювання використовуються різноманітні функціональні залежності між вимірюваннями та часом, розподіляючи мінімуми та максимуми дифракційної картини.

Безконтактні методи класифікуються:

- пневматичні;
- ультразвукові;

– оптичні.

Розглянемо кожен безконтактний метод трішки детальніше за для вибору найкращого методу дослідження філаменту.

1.2.1.1 Пневматичний метод

Пневматичний метод є одним з перших безконтактних методів розроблений для виробничої лінії. Пневматична установка без переривань фіксує відхилення діаметру від номінального значення шляхом вимірювання потоку зазори між двома вимірювальними пристроями.

Описаний метод забезпечує маленьку похибку приблизно 100 мкм та має серйозні недоліки, такі як нероздільна конструкція вимірювального пристрою та обмежений діапазон вимірювальних діаметрів.

Крім того недоліком є те, що пневматичні мікрометри не фіксують овальність продукту і не є зручним для використання при дослідженні діаметру філаменту. Також є труднощі з підтримкою таких пристроїв. Вираховується час випущеним та прийнятим імпульсами.

1.2.1.2 Ультразвуковий метод

Принцип роботи ультразвукового методу полягає в методі ехо-імпульса, в якому вимірюється час між імпульсом, що випускається та прийнятим імпульсом, що був відбитий від інтерфейсу середовища. Ультразвуковий перетворювач має п'єзоелектричний кристал, який після впливу на нього імпульсом напруги в невеликий період часу випромінює звукову хвилю. При проході через інтерфейс середовища швидкість випроміненої хвилі змінюється. Ця зміна викликає відображення частини енергії хвилі назад на перетворювач. Знаючи швидкість і час, розраховується відстань L_1 до об'єкта, що вимірюється. Використовуючи два ідентичних конвертера, розташованих на відомій відстані L розраховується діаметр вимірюваного об'єкта як $D = L - (L_1 + L_2)$.

До основних недоліків відноситься часте обслуговування пристроїв побудованих на цьому методі, швидке погіршення похибки та необхідність частого обслуговування пристроїв.

1.2.1.3 Оптичні методи

Оптичні методи використовують в оптико-електричних пристроях з використанням кодування оптичних масштабів, методів перешкод, принципів амплітудної та імпульсної модуляції, реалізованих на основі використання лазерної технології, мікроелектроніки та мікроконтролерів [3].

Аналіз оптичних пристроїв дозволив ідентифікувати чотири найбільш розповсюджених оптичних методи вимірювання діаметру:

- метод вимірювання потужності потоку випромінювання;
- метод вимірювання скануванням;
- тіньовий метод в квазіпаралельному пучку;
- дифракційний метод.

Всі ці методи характеризуються високою швидкістю, невеликою похибкою, чудовою стійкістю до перешкод. Розглянемо кожен оптичний метод окремо.

1.2.1.3.1 Метод вимірювання потужності потоку випромінювання

Метод, представлений на рисунку 1.6, заснований на вимірюванні потужності випромінювання, яке сприймається фотоприймачем. Виміряний об'єкт перебуває у робочій області, якою проходить паралельний світловий потік від освітлювача. Об'єкт частково блокує світловий потік і, відповідно, зменшує потужність випромінювання фотоприймача. Зміни потужності випромінювання, що сприймаються фотоприймачем, потім перераховуються для отримання діаметру.

Для використання даного способу вимірювання потрібне джерело зі стабільною випромінювальною здатністю, яка плином часу залишається постійною, а також приймач оптичного випромінювання із постійною чутливістю.

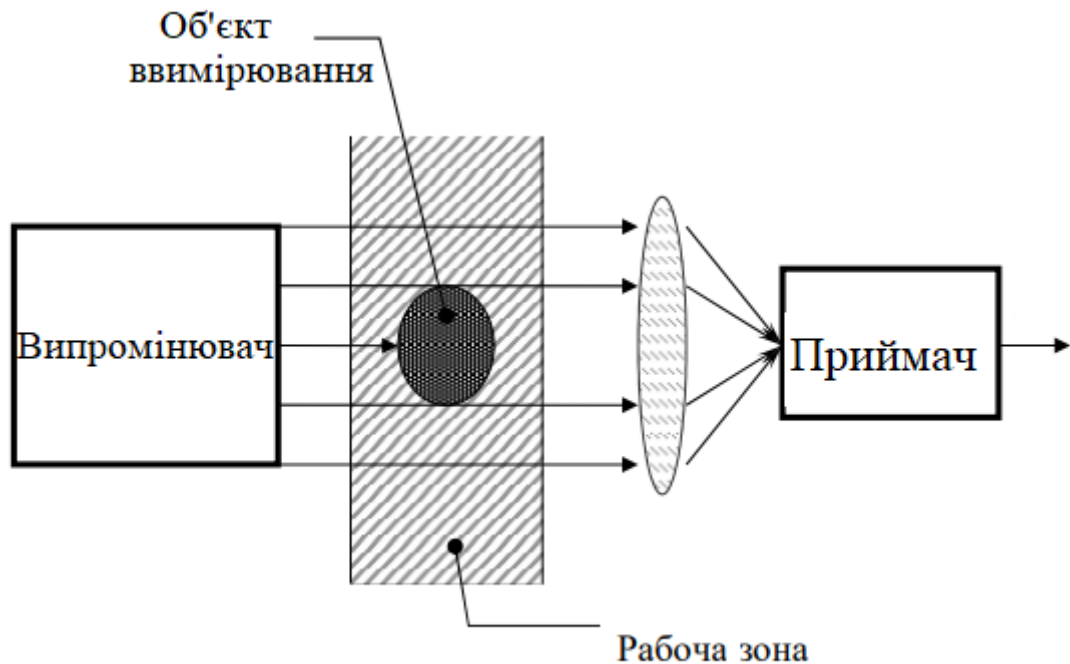


Рисунок 1.6 – Метод вимірювання потужності потоку випромінювання

У реальних умовах за наявності зовнішніх факторів, що дестабілізують, ці умови навряд чи досяжні. З цієї причини прилад вимагає частого калібрування та не має достатньої точності вимірювання.

Необхідність вимірювання миттєвих значень потужності, а також у деяких варіантах оптичної схеми та необхідності вимірювання механічних рухів обмежують застосування методу.

1.2.1.3.2 Метод вимірювання скануванням

Принцип методу показаний на малюнку 1.7 та містить блок сканування, який генерує тонкий промінь, який рівномірно переміщається з постійною швидкістю V області вимірювання шириною W . Пучок переривається вимірюванням об'єкта, і імпульс з'являється на фотоприймачі, який приймає випромінювання, тривалість якого дорівнює часу t руху пучка в поперечному перерізі кабелю.

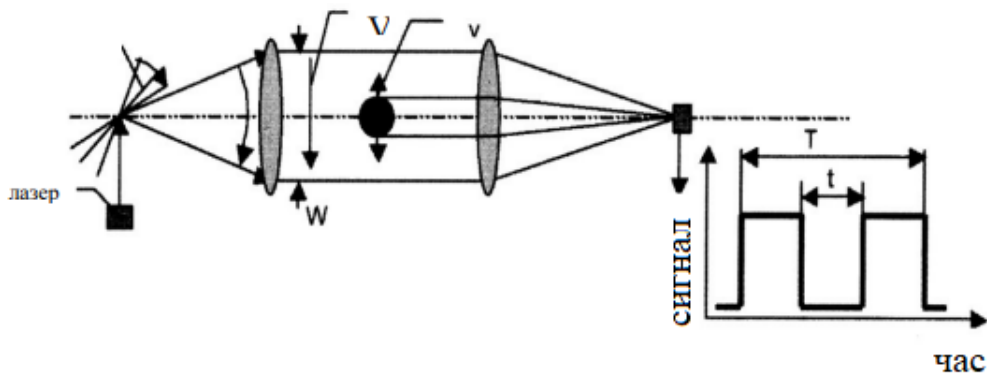


Рисунок 1.7 – Схема методу вимірювання скануванням

Довжину імпульсу фотоприймача вимірюють та перетворюють в діаметр об'єкта користуючись співвідношенням

$$D = \frac{t}{T} W, \quad (1.1)$$

де T – період сканування всієї робочої зони.

Оскільки час t залежить від особистої швидкості вимірювального об'єкта v розрахунки по цій формулі будуть справедливими тільки в випадку, коли швидкість буде рівна нулю (1.2, 1.3).

$$t = \frac{D}{V \pm v}, \quad (1.2)$$

при $v = 0$

$$t = \frac{D}{V}. \quad (1.3)$$

При сильних вібраціях об'єкта похибка може збільшитися, тому повинен бути додатковий стабілізатор. Компактні напівпровідникові лазерні модулі використовуються в якості джерел випромінювання в відповідних оптичних схемах. Пучок переміщається в зоні обертаючим шестикутним люстерком, а в останніх розробках цього типу вібрує п'єзоелектричне люстерко.

1.2.1.3.3 Тіньовий метод в квазіпаралельному пучку

Тіньовий метод частіше всього використовується в вимірюванні діаметру кабелю. Його оптична схема зображена на рисунку 1.8.

Випромінювач використовує оптичну систему коліматора для створення променя світла поблизу паралелі в робочій області, через яку об'єкт, що вимірюється, переміщається горизонтально. Тінь об'єкту падає на багатоелементний фотоприймач, комірки якого розташовані вертикально по лінії. Кількість темних осередків n фотоприймача, помножена на ширину одного осередку l , відповідає діаметру кабелю і може бути розрахована $D = n \cdot l$ при опитуванні осередків.

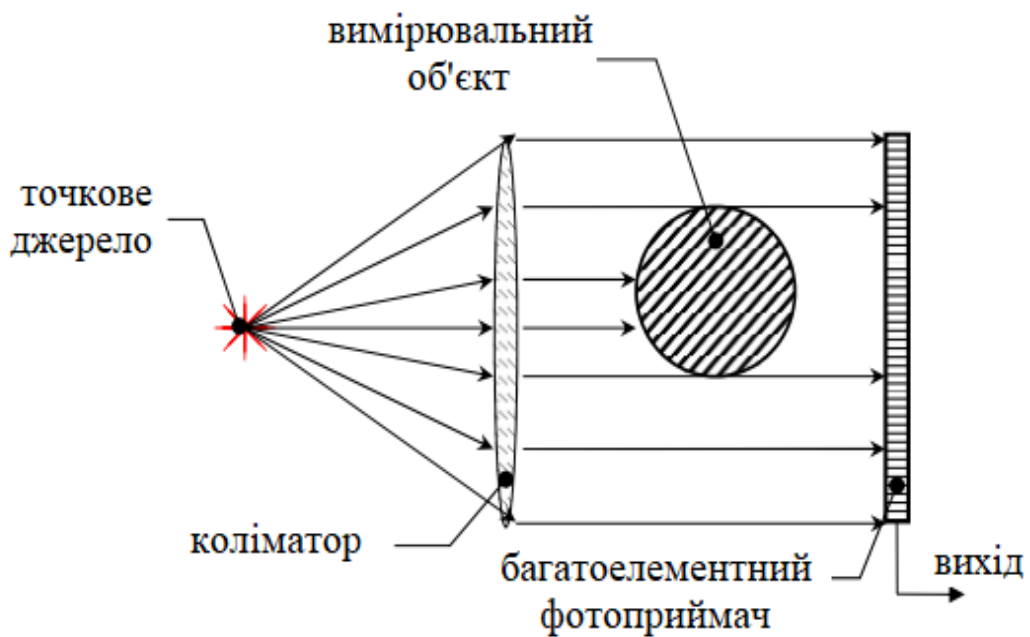


Рисунок 1.8 – Тіньовий метод в квазіпаралельному пучку

Сучасні лінійні багатоелементні фотоприймачі мають розмір комірки від 2 мкм до 60 мкм, що дозволяє забезпечити відповідну похибку вимірювання. Як джерело випромінювання можна використовувати лампу розжарювання, один світлодіод, випромінювання якого подається на точкове джерело за допомогою додаткової оптики або напівпровідниковий лазерний модуль. Використання

лазерного модуля є кращим, оскільки це джерело найбільш наближене до точкового, що спрощує оптичну схему та процес її налаштування та вирівнювання.

Основний внесок у помилку при використанні цього методу робить неідеальність оптичної системи коліматора, яка перетворює світло від точкового джерела на квазіпаралельний пучок. Наявність аберацій і помилка вирівнювання призводять до того, що світловий потік у робочій області відрізняється від паралельного, що при переміщенні об'єкта, вимірювального об'єкта, в робочій зоні сильно впливає на помилку вимірювання. Чим більша зона вимірювання, тим більше діафрагма коліматора має бути, і чим більше діафрагма, вплив цього типу помилки на результат вимірювання збільшується, навіть якщо використовується лінійка фотодетектора з меншим кроком. З тієї ж причини метод не підходить для вимірювання малих об'єктів діаметром менше 0,5 мм, оскільки величина помилки можна порівняти з діаметром об'єкта вимірювання. Цей метод застосовується для вимірювань у діапазоні діаметрів приблизно від 1 мм до 30 мм.

1.2.1.3.4 Дифракційний метод

Для підвищення точності вимірювання діаметра тонких проводів використовується явище дифракції світла[4].

Дифракція – явище, що відбувається, коли хвиля зустрічає перешкоду. У класичній фізиці явище дифракції описується як очевидний вигин хвилі навколо невеликих перешкод та поширення хвиль через перехід невеликих отворів. Подібні ефекти виникають, коли світлова хвиля проходить через середовище з різними показниками заломлення, або звукова хвиля проходить через один зі змінним акустичним опором. Дифракційні ефекти відбуваються в всіх хвилях, у тому числі звукових хвилях, хвилях на воді, та електромагнітних хвилях, таких як видиме світло, рентгенівські промені та радіохвилі.

Як фізичні об'єкти мають хвильові властивості (на атомному рівні), дифракція також відбувається з речовиною і може бути вивчена відповідно до принципів квантової механіки.

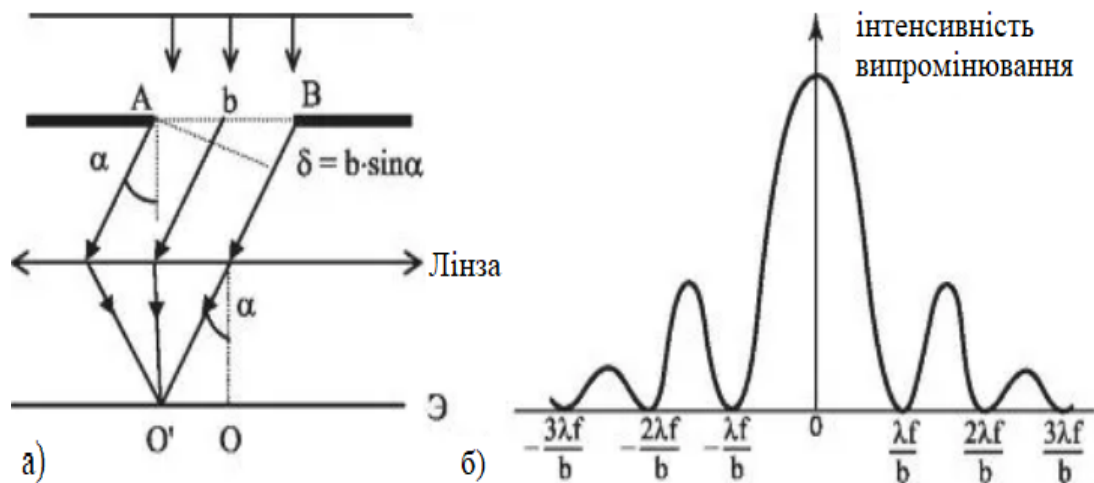


Рисунок 1.9 – Дифракція однією щілини: а - хід променів; б - розподіл інтенсивності світла (f - фокусна відстань лінзи)

Промінь світла, що обходить тонкий шматочок, створює дифракційний силует, який залежить від діаметра. Багатоелементний приймач перетворює дифракційну картину в електронні сигнали, які потім перетворюються на значення діаметра. Чим тонший виріб, тим різкіша дифракційна картина і тим вища точність виміру.

Цей метод може бути реалізований, як незалежно, в метрах діаметра виробів малих і надмалих секцій, так і як допоміжний інструмент для зменшення похибки існуючих вимірювачів діаметрів на основі методів вимірювання тіней.

1.2.1.4 Аналіз та вибір методу дослідження геометричних властивостей філаменту

За допомогою сучасних методів геометричних вимірів ми можемо отримувати діаметри різноманітних об'єктів в тому ж роді і філаментів для 3D-друку.

Проаналізувавши методи геометричного контролю, до яких можна віднести пневматичні, ультразвукові та оптичні методи найкращими обрано оптичні

опираючись на їх високу точність виміру, високою перешкодостійкістю та високою швидкістю вимірювання.

В даний час оптичні методи неруйнівного виміру – це найбільш перспективні методи отримання геометричних параметрів протяжних виробів. Дуже важливим та актуальним завданням є контроль діаметра протяжних виробів малого перерізу (від одиниць до сотень мкм), таких як синтетичні волокна, нитки, тонкі дроти або пластик для 3D-друку, тощо.

Проаналізувавши можливі оптичні методи серед яких метод вимірювання потужності потоку випромінювання, метод вимірювання скануванням, тіньовий метод в квазіпаралельному пучку та дифракційний метод обрано саме диференційний так, як він є найбільш перешкодостійким, легким в експлуатації та найбільш точним серед всіх інших оптичних методів.

Для вирішення цього завдання найбільш добре підходять інтерференційні методи контролю, які мають більш високу роздільну здатність в даному діапазоні значень, що дозволяють за розподілом дифракційних екстремумів отримувати значення контрольованого геометричного параметра.

1.2.2 Огляд методів дослідження фізичних властивостей філаменту

1.2.2.1 Теплові (інфрачервона термографія) методи

Інфрачервона термографія (IRT) також відома як термографічне випробування або тепловізор. Це метод неруйнівного та безконтактного випробування, який переважно використовується для виявлення та визначення характеристик поблизу поверхневих дефектів/дефектів у матеріалах за допомогою зображення та аналізу структури. теплові моделі, як показано на рисунку 10. Перевірка матеріалу стає можливою завдяки змінам температури його поверхні або видимої температури поверхні (гарячі чи холодні зони) через наявність дефектів.

Як загальна передумова, використання IRT для неруйнівного контролю та діагностики вимагає, щоб міцний матеріал мав відносно однорідні та відомі термічні

характеристики, такі як теплопровідність, питома теплоємність і температуропровідність серед інших. Вважається, що цей метод забезпечує хороші результати для дефекту, діаметр якого менший за його глибинне розташування. IRT зазвичай класифікується на дві категорії, а саме «пасивний» (стаціонарний) і «активний» (нестационарний). У пасивній термографії температурні коливання матеріалу вимірюють за допомогою інфрачервоного випромінювання без зовнішніх джерел тепла. Пасивна термографія, як правило, використовується для матеріалів, які не знаходяться в тепловій рівновазі, і характеристики, що цікавлять, мають температуру, відмінну від температури середовища, в якому вони працюють (тобто; при вищій або нижчій температурі, ніж фон)[5].

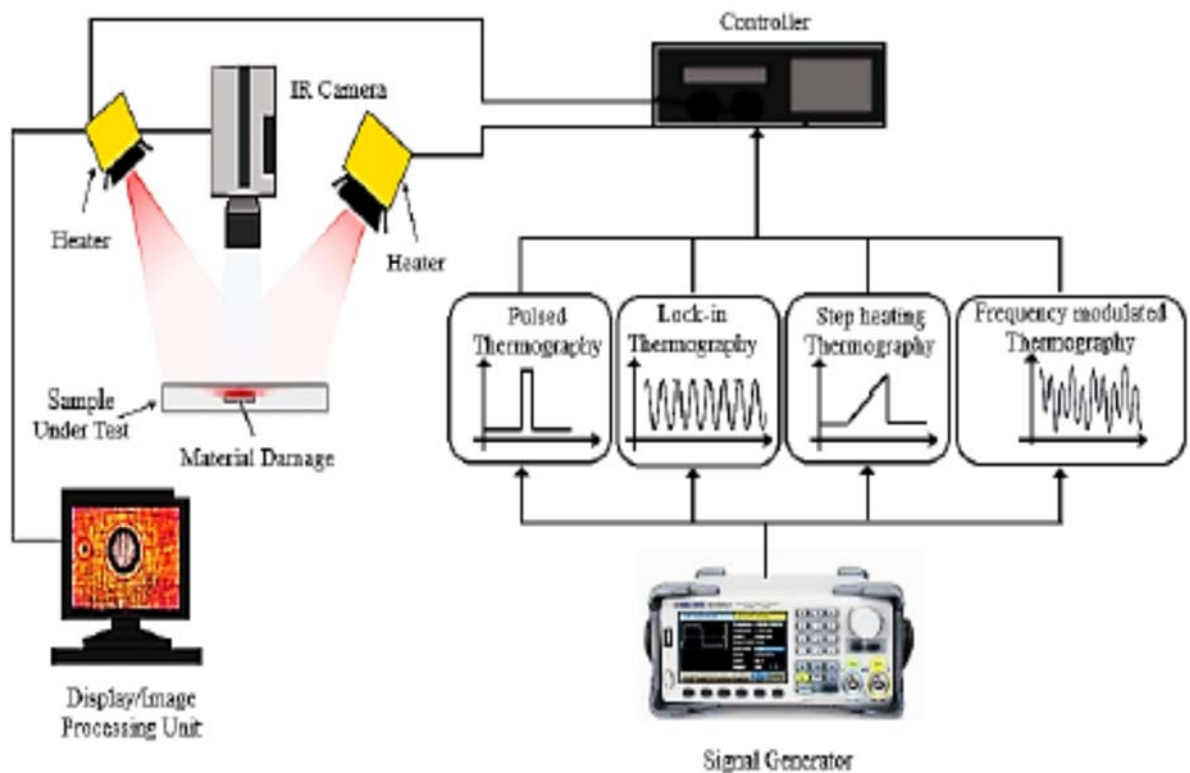


Рисунок 1.10 – Типове схематичне зображення оптично стимульованої термографії.

На відміну від пасивної термографії, активна термографія використовує зовнішнє джерело збудження (тобто оптичне випромінювання, електромагнітну стимуляцію та механічні ультразвукові хвилі) для генерування тепла в

досліджуваній структурі, а кількісне визначення глибини дефекту значною мірою залежить від теплопровідних можливостей тестової структури. від поверхні до внутрішніх ділянок і її зворотне відображення. В даний час існує кілька типів стилю нагрівання, включаючи термографію поверхневого нагрівання (тобто; поверхня досліджуваної структури нагрівається оптично), термографію з об'ємним нагріванням (тобто; зразок об'ємно нагрівається за допомогою збудження, такого як мікрохвилі), і термографію з аномальним нагріванням, (тобто лише дефекти або штучні вставки вибірково нагріваються, а не основний матеріал).

Під час його роботи інфрачервоною камерою реєструються градієнти температури, а термограми аналізуються, щоб отримати інформацію про пошкодження.

На рисунку 1.11 показано, як розмір пошкодження оцінюється за чіткими термограмами.

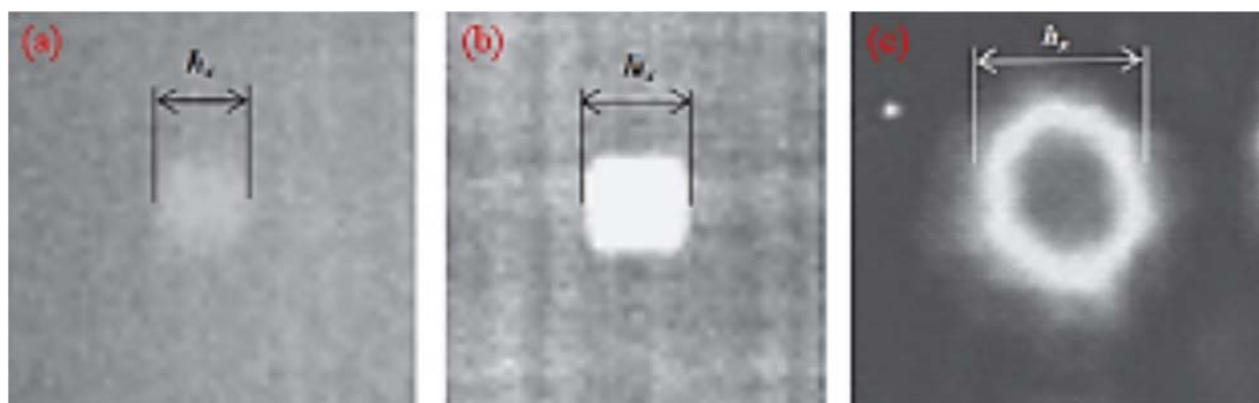


Рисунок 1.11 – Оцінка видимого розміру дефекту

У літературі зазначено, що існує ряд варіантів цієї методики і їх найпоширеніші форми вимагають для роботи теплового збудження за допомогою імпульсної або безперервної (модульованої) лампи (тобто оптичне збудження), електромагнітні сигнали, напруга/деформація або акустична вібрація конструкції з використанням високопотужного ультразвукового джерела, що покращує властивості тестування. Методи, засновані на тепловізійному зображенні, які використовують оптичне збудження, є найбільш поширеними завдяки їх швидкості

та відносно економічній ефективності порівняно з іншими методами неруйцнівного контролю. Хоча ці методи можуть оцінювати різні типи поверхневих і підповерхневих дефектів у поєднанні з обробкою сигналів, вони все ще не дуже чутливі до глибоких пошкоджень і мікротріщин розмірами від 10 мкм до кількох міліметрів. Термографічні методи, стимульовані ультразвуковими або звуковими хвилями, також називаються вібротермографічними методами або ультразвуковою термографією, і вони включають ультразвукову частотно-модульовану термографію (UFMT), ультразвукову спалахово-фазову термографію (UBPT) і ультразвукову синхронну термографію (ULT).

На відміну від класичної термографії, у вібротермографічних методах зразок механічно збуджується ультразвуковими або звуковими хвилями через з'єднання ультразвукового перетворювача з поверхнею зразка. Загалом, поширення затухаючих акустичних хвиль вздовж матеріалу перетворює механічну енергію в теплову, але поблизу дефектів розсіювання енергії є більшим через тертя між поверхнями дефекту та/або концентрацію напруги в навколишньому середовищі. Це механічне збудження діє як селективне внутрішнє джерело тепла, розташоване безпосередньо на дефекті, яке дифундує всередину матеріалу та може бути виявлено як зміна температури на його поверхні за допомогою інфрачервоної камери.

Техніки термографії на основі електромагнітного збудження, такі як термограф із моделюванням вихрових струмів і мікрохвильова термографія, також є іншими варіантами методів тепловізорів, доступні у літературі. Незважаючи на те, що стимульована вихровими струмами термографія може виявити як поверхневі, так і підповерхневі дефекти (тріщини, відшарування та порожнечі), а також вказати структуру волокон, ця методика все ще обмежена плоскими дефектами в ближньому полі як у провідних, так і в напівпровідникових матеріалах, і сильно страждає від нерівномірного нагрівання.

Загалом було доведено, що методи на основі теплових зображень здатні виявляти розшарування, проникнення вологи, пошкодження від удару, міжшарові розриви, пористість і розтріскування волоконної матриці, де значна різниця в теплопровідності між цими матеріалами та різними дефектами, такими як

захоплення повітря та води, вдалося отримати якісні контрольні вимірювання неруйнівного контролю.

Підводячи підсумок, IRT можна використовувати для виявлення ряду дефектів поблизу поверхні, включаючи зміщення волокон, порожнечі та включення шлаку серед іншого, навіть якщо доступна лише одна сторона конструкції. IRT також вважається цінним засобом онлайн-контролю поведінки матеріалів, які піддаються різним рівням механічних навантажень IRT також можна використовувати для виявлення кількох типів деградації матеріалу, таких як пошкодження від удару та отвори, які виникають протягом терміну служби матеріалу.

Методика надає корисну інформацію для характеристики матеріалу шляхом візуалізації теплового сигналу, викликаного ударом, зокрема під час аналізу ініціювання та поширення пошкодження від удару, завдяки своїй здатності описувати всю область, уражену ударом, і ідентифікувати смуги збільшення шкоди. Його головні недоліки включають потребу у високочутливих приладах, кваліфікованих інспекторах, а також недостатню чіткість дефектів, які потрапляють занадто глибоко під поверхню матеріалу. Багато було зроблено з моменту появи на ринку першого інфрачервоного фотоапарата, але багато ще належить зробити[6].

1.2.2.2 Терагерцова спектроскопія та іміджинг

Терагерцова (ТГц) спектроскопія використовує ТГц випромінювання (0,1–10 ТГц) для отримання відсканованих зображень досліджуваної структури шляхом відбиття або передачі за допомогою передавальної та приймальної антен. ТГц випромінювання має хорошу проникаючу здатність для непровідних матеріалів (наприклад, пінопласту, скла, смоли, фарби), і ця методика привернула значний інтерес у ряді застосувань, що призвело до її швидкого поширення в спільноті останні роки.

Система індукує короткі хвилі ТГц у матеріалі, які взаємодіють з різними фазами всередині (наприклад, включеннями, дефектами або пошкодженнями тощо),

і шляхом аналізу відбитих або переданих хвиль ТГц визначаються внутрішні особливості матеріалу. Відзначено, що непровідні багатофазні та багатошарові композитні структури є найкращим кандидатом для неруйнівного контролю на основі ТГц. НК на основі ТГц зазвичай виконується з використанням системи спектроскопії в ТГц часовій області (THz-TDS), яка також називається імпульсною спектроскопією, або системи безперервної хвилі (THz-CW). У системі THz-TDS короткоімпульсні хвилі ТГц утворюються після оптичного збудження фотопровідної антени за допомогою лазерного імпульсу, випромінюваного фемтосекундним блоком, вимірюється залежна від часу зміна ТГц електричного поля одного імпульсу. і використовується для отримання інформації про фазу в матеріалі, що тестується.

У системі THz-CW високопотужні ТГц хвилі виробляються газовими лазерами, квантовими каскадними лазерами або параметричними джерелами, а інформація про фазу вимірюється шляхом реєстрації середньої інтенсивності (тобто амплітуди хвилі) електромагнітного поля. Рисунок 1.12 ілюструє основні компоненти ТГц системи.

Розробка передових ТГц систем за останні два десятиліття дозволила застосувати багато ТГц систем візуалізації в сфері неруйнівного контролю.

Таким чином, ТГц системи є ефективним інструментом для спільноти NDT&E для перевірки та опису властивостей матеріалів.

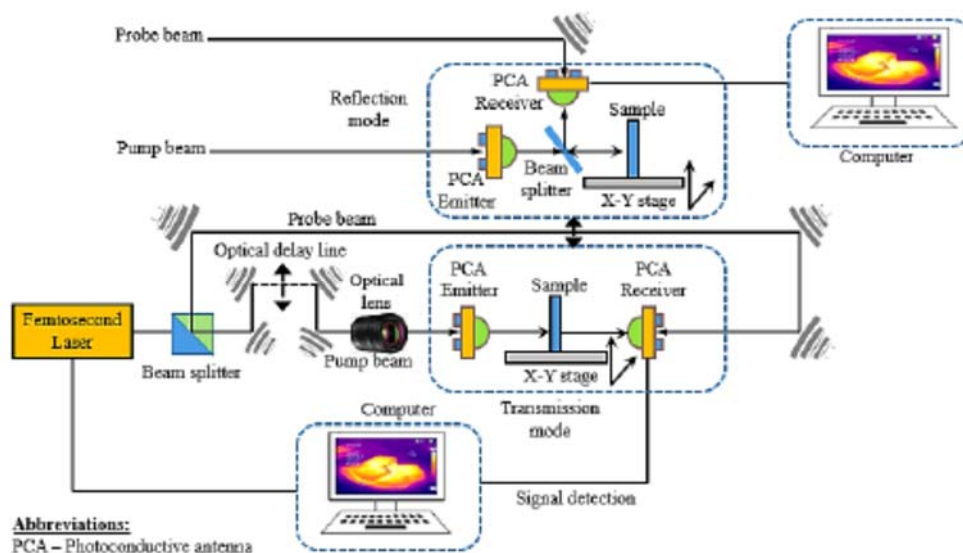


Рисунок 1.12 – Детальне представлення роботи системи THz-TDS в режимах відбиття та передачі.

1.2.2.3 Аналіз та вибір методу дослідження фізичних властивостей філаменту

Таким чином було розглянуто два методи дослідження філаменту:

- тепловий;
- терагерцовий.

Проаналізовано їх принцип роботи, технології їх виконання та особливості використання. Для дослідження філаменту було обрано терагерцовий метод, так як він є більш зручним, гнучким та легшим в виконанні та використанні.

2 РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА СПІВВІДНОШЕНЬ

2.1 Модель і метод визначення геометричних властивостей (діаметра)

Дифракційний метод складається з таких етапів. Промінь світла, зібраний у тонкий пучок, створює дифракційний силует, який представляє собою функцією діаметра. Багатоелементний приймач перетворює дифракційну картину в електронні сигнали, які потім перетворюються на значення діаметра картини. Чим тонший досліджуваний зразок нитки, тим чіткіша дифракційна картина і вища точність вимірювання.

2.1.1 Дифракції плоскої хвилі на круглому металевому однорідному діелектричному циліндрі

Розв'язок задачі дифракції плоскої хвилі на круглому металевому однорідному діелектричному циліндрі записується у вигляді розкладу за циліндричними функціями як для паралельної, так і для перпендикулярної поляризації хвилі відносно осі циліндра. Базовою моделлю є однорідний циліндр без оболонки з певним радіусом і діелектричним показником заломлення, на який падає монохроматична хвиля довжиною λ , що поширюється в навколишньому просторі з власним показником заломлення[7]. Сформована дифракційна картина спостерігається в дальній зоні (рисунок 2.1).

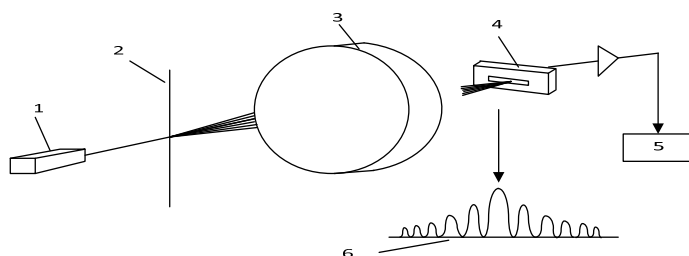


Рисунок 2.1 – Вимірювання діаметра дроту, засноване на явищі дифракції світла: 1 – лазер; 2 – дрот; 3 – лінза; 4 – багатоелементна ствольна коробка; 5 – калькулятор; 6 – дифрактограма на багатоелементному приймачі

Для нескінченного прямого кругового циліндра будемо виходити зі скалярного хвильового рівняння 2.1

$$\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0, \quad (2.1)$$

які в циліндричних координатах r, φ, z записується у формі

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k^2 \psi = 0, \quad (2.2)$$

Використане в цьому методі розділення змінних однозначним шляхом φ рішення виглядає як

$$\psi_n(r, \varphi, z) = Z_n(\rho) e^{in\varphi} e^{ihz} \quad (n = 0, \pm 1, \dots), \quad (2.3)$$

де $\rho = r\sqrt{k^2 - h^2}$,

Z_n – розв'язок рівняння Бесселя.

$$\rho \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{d}{d\rho} Z_n \right) + (\rho^2 - n^2) Z_n = 0, \quad (2.4)$$

Лінійно незалежними розв'язками рівняння є функції Бесселя першого та другого роду (J_n і Y_n) з цілим індексом n . Загалом, для постійного h обмежень не накладається, але в проблемах, які ми розглядаємо, значення h визначається за в типом поля інциденту і в потребі задовольнити в межах умови на зовнішній поверхні з в циліндр .

$$\begin{aligned} [E_2(x) - E_1(x)] \times \hat{n} &= 0 \\ [H_2(x) - H_1(x)] \times \hat{n} &= 0, \quad x \text{ is on } S' \end{aligned} \quad (2.5)$$

де \hat{n} – зовнішня нормаль до поверхні S .

Такі граничні умови являють собою вимогу безперервності тангенціальних компонент E і H .

Можливі два напрямки поляризації падаючої хвилі: її електричне поле може бути поляризовано паралельно площині xz або перпендикулярно до неї. Кожну з цих поляризацій ми розглянемо окремо [8]. Електричне поле, паралельної площині XZ .

Якщо падаюче поле спрямоване по нормалі до осі циліндра ($\xi = 90^\circ$)

$$b_{nI}(\xi = 90^\circ) = b_n = \frac{J_n(mx)J'_n(x) - mJ'_m(mx)J_n(x)}{J_n(mx)H_n^{(1)}(x) + mJ'_n(mx)H_n^{(1)}(x)}, \quad (2.6)$$

Електричне поле, перпендикулярне до площини XZ

$$a_{nII}(\xi = 90^\circ) = a_n = \frac{mJ'_n(x)J_n(mx) - J_n(x)J'_n(mx)}{mJ_n(mx)H_n^{(1)}(x) - J'_n(mx)H_n^{(1)}(x)}, \quad (2.7)$$

При нормальному падінні світла на циліндр коефіцієнти у виразах для розсіяного поля приймають найпростіший вигляд

$$D_n(\rho) = \frac{J'_n(\rho)}{J_n(\rho)}, \quad (2.8)$$

І скориставшись рекурентним відношенням

$$Z'_n(x) = Z_{n-1}(x) - \frac{n}{x} Z_n(x), \quad (2.9)$$

де Z_n – довільна функція Бесселя.

Коефіцієнти можна переписати у вигляді

$$a_n = \frac{[D_n(mx) / m + n / x] J_n(x) - J_{n-1}(x)}{[D_n(mx) / m + n / x] H_n^{(1)}(x) - H_{n-1}^{(1)}(x)}, \quad (2.10)$$

$$b_n = \frac{[mD_n(mx) + n / x] J_n(x) - J_{n-1}(x)}{[mD_n(mx) + n / x] H_n^{(1)}(x) - H_{n-1}^{(1)}(x)}, \quad (2.11)$$

Логарифмічна похідна підкоряється рекурентному співвідношенню

$$D_{n-1}(z) = \frac{n-1}{z} - \frac{1}{(n/z) + D_n(z)}, \quad (2.12)$$

2.1.2 Діаметр волокна через індикатрису розсіювання

Точний математичний вираз для дифракції електромагнітної хвилі на круглоциліндричному волокні для картини розсіювання в дальній зоні (рис. 2.2, 2.3) $F(\varphi)$

$$F(\varphi) = |T(\varphi)|^2, \quad (2.13)$$

У разі Е-поляризації

$$T(\varphi) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l \cos l\varphi, \quad (2.14)$$

де $x = \pi d / \lambda$ – діаметр волокна;

λ – довжина хвилі падаючої хвилі;

m – відносний комплексний показник заломлення;

φ – кут дисперсії, відрахований від напрямку поширення падаючої хвилі.

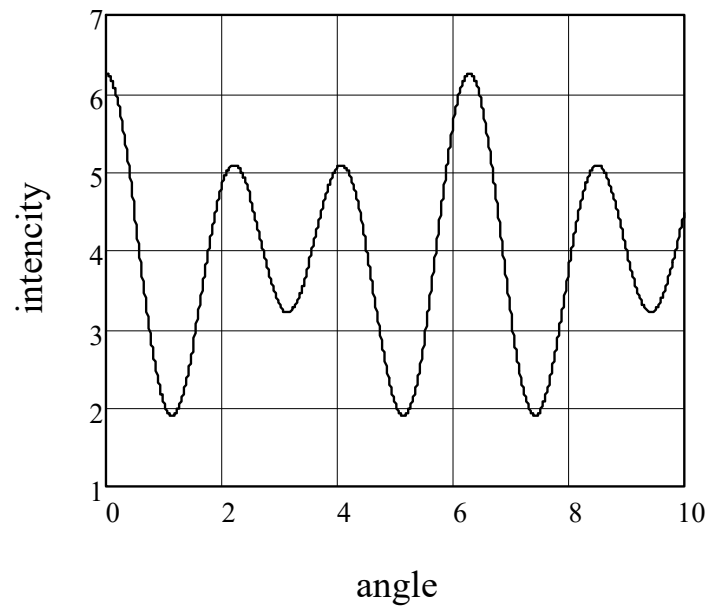


Рисунок 2.2 – Індикатриса розсіювання в декартових координатах

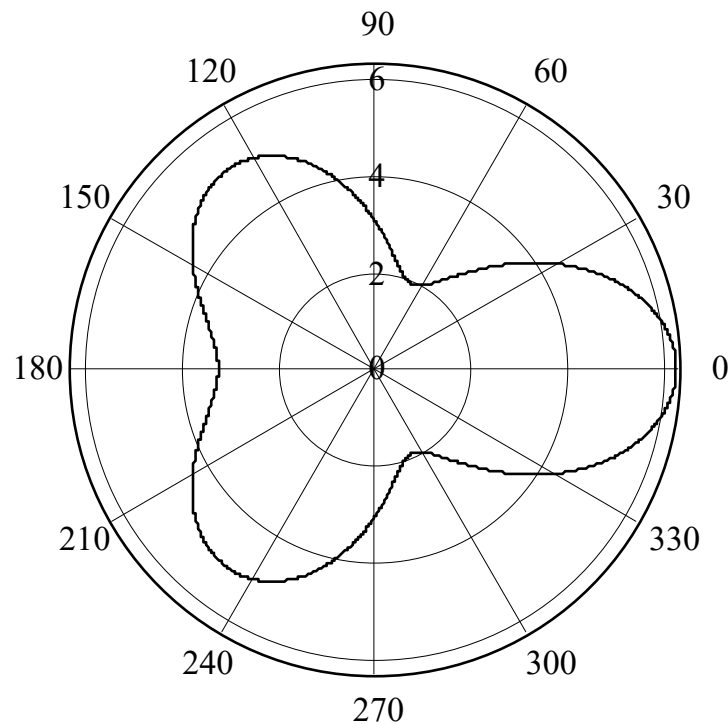


Рисунок 2.3 – Індикатриса розсіювання в полярних координатах

Для визначення діаметра волокна необхідно вирішити обернену задачу, тобто виміряти положення нулів індикатриса розсіювання і знайти діаметр[9].

Доповнена формула індикатриса розсіювання має вигляд

$$I(\varphi) = \frac{\left| \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m (i)^m a_m \cos(\varphi_m) \right|^2}{\left| \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m (-i)^m a_m \right|^2}, \quad (2.15)$$

Розглянемо необмежений двошаровий циліндр, у якого вісь системи координат збігається з віссю циліндра, на який перпендикулярно до осі падають дві синфазні плоскі Е-поляризовані хвилі. Перша хвиля поширюється під кутом θ до осі OX , а друга під кутом $-\theta$, тому кут між ними дорівнює 2θ :

$$I(\varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m b_m \cos(m\varphi) \cos(m\theta)$$

$$\varepsilon_m = \begin{cases} 1, & \text{for } m = 0 \\ 2, & \text{for } m > 0 \end{cases}, \quad (2.16)$$

Інтенсивність випромінювання $I(\alpha)$, розсіяного в напрямку азимутального кута α в дальній зоні на відстані r від осі металевого циліндра, значно більший за його діаметр ($r \gg 2R_1$), описується формулою

$$I(\alpha) = \left| \frac{2}{\pi k r} e^{\left(-ikr + i\omega t - i\frac{3}{4}\pi\right)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} b_m e^{im\alpha} \right|^2, \quad (2.17)$$

яка отримана з точного розв'язку рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами[10]. Для випадку діелектричного циліндра поле представляється у вигляді двох окремих розв'язків для обох геометричних зон: зовні та всередині волокна з урахуванням поляризації падаючого випромінювання.

При нормальному падінні випромінювання коефіцієнти у виразах для розсіяного поля мають вигляд: поле паралельне осям XZ.

2.1.3 Визначення форми волокна

Особливості явища розсіювання хвиль діелектричним циліндром при його опроміненні двома плоскими хвилями, що поширюються під різними кутами. Форму поперечного перерізу циліндрів доцільно досліджувати, зондуючи його двома пучками опромінення.

Розглянемо падіння на перпендикулярний до осі циліндр двох синфазних площинних Е поляризованих хвиль однакової амплітуди. Напрямок поширення першої плоскої хвилі утворює з віссю OX азимутальний кут θ , а другої хвилі – кут $(-\theta)$. Отже, кут між напрямками поширення двох хвиль дорівнює (2θ) [11]. Діаграму

розсіювання (асимптотику повного розсіяного поля в дальній зоні на великій відстані від циліндра) можна представити у вигляді

$$U = \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_m \left[J_m(n_0kr) - b_m^{(E)} H_m^{(2)}(n_0kr) \right], \quad (2.18)$$

2.1.4 Бічні розміри зразків

Бічні розміри зразків повинні бути достатньо великими, щоб вмістити терагерцовий промінь без відсікання або дифракції країв. Недостатній розмір зразка може спричинити два типи артефактів вимірювання або систематичної помилки: по-перше, терагерцовий промінь, що просочується по краях, вироблятиме блукаючий сигнал у часовій області, що збігається з опорним сигналом і зміщується назад відносно сигналу вибірки. У частотній області це призведе до амплітудних коливань, подібних до коливань Фабрі-Перо[12].

Витоку пучка можна запобігти, оформивши зразок в отвір відповідного розміру, вирізаний у непрозорому матеріалі, наприклад, металевій пластині. Слід зазначити, що цей отвір повинен зберігати своє положення для контрольного вимірювання, щоб забезпечити правильну нормалізацію, по-друге, терагерцовий промінь буде дифрагувати на краях зразка; або, якщо зразок встановлено в отвір, за краї отвору.

Якщо частини дифракційного променя досягають детектора, це може спричинити частотно-залежні спектральні явища, оскільки різні компоненти дифракційного променя проходять різні оптичні шляхи. Цьому можна запобігти, розмістивши діафрагму близько до детектора, щоб обмежити її приймальний конус. Застосовуються інші критерії розміру зразка, коли терагерцовий промінь, який використовується для дослідження зразка, колімований або сфокусований. Щоб мінімізувати помилки, що виникають через спотворення хвильового фронту, бажано, де це можливо, використовувати колімований промінь.

На рисунку 2.4 зображено вимірний діаметр променя як функцію частоти для сфокусованого та колімованого пучків до $4w$, де w — радіус гаусового променя. Також на рисунку 2.4 показано очікувані діаметри променя для дзеркальної конфігурації. Видно, що вимірний діаметр променя суттєво відрізняється від розрахункових значень.

Зокрема, сфокусований промінь у 2,5 рази більший за очікуваний діаметр. Це може бути наслідком комбінації незначних зсувів, дефектів кривизни дзеркала та відхилення терагерцового випромінювача від ідеального точкового джерела. Як наслідок, для розміщення $> 95\%$ амплітуди променя розмір вибірки має бути > 10 Вт у фокусі та $> 2,5$ Вт у колімованому пучку.

Додатковим фактором, який необхідно враховувати при використанні сфокусованого променя, є його довжина Релея. Це відстань, на яку перетяжка променя розширюється в 2 рази. Якщо товщина зразка порівнянна з довжиною Релея сфокусованого променя, його бічні розміри також повинні бути подвоєні [13].

Однак вимога до розміру пом'якшується показником заломлення матеріалу зразка: як перетяжка променя, так і його Релея зменшуються пропорційно показнику заломлення. Діаметр променя визначається як 95% амплітуди пропускання, відповідно.

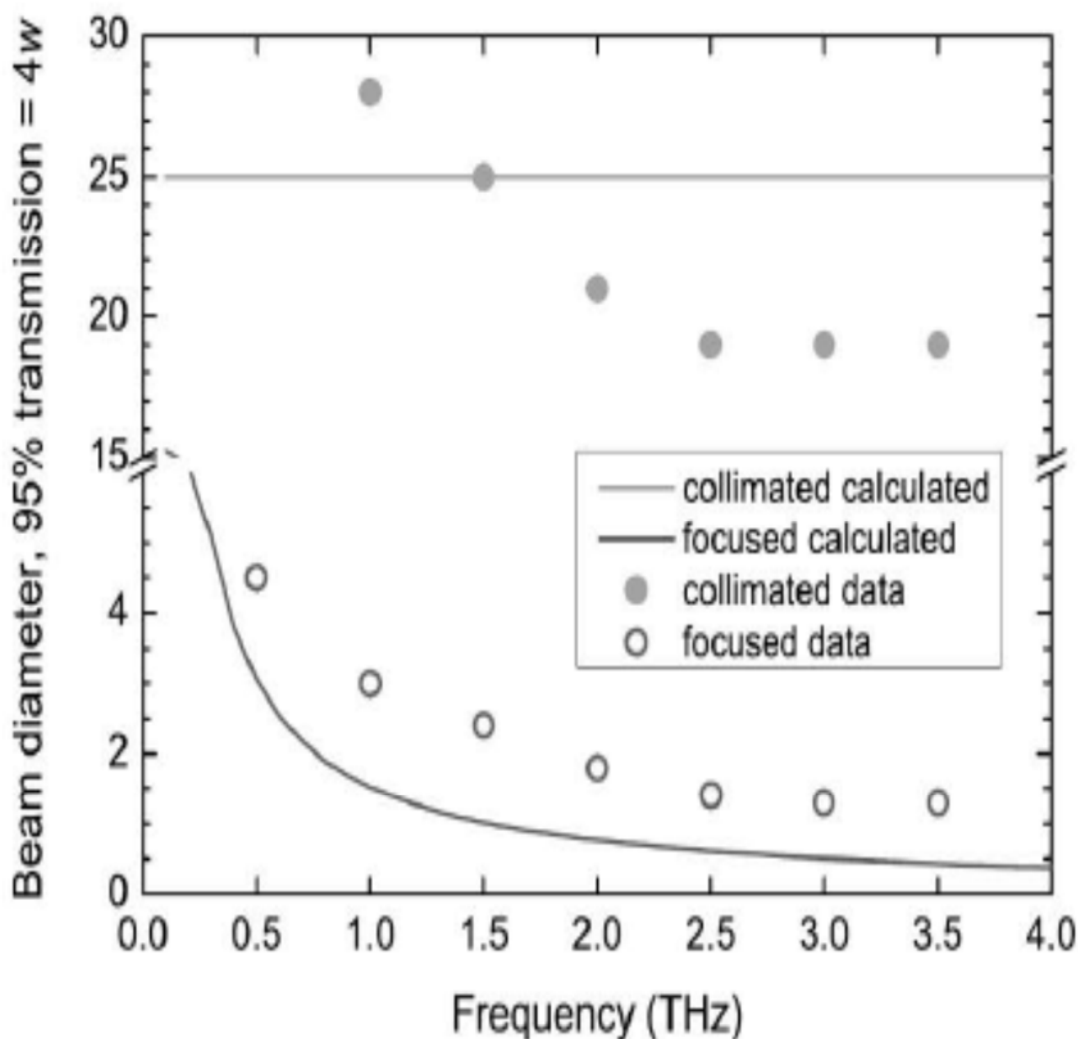


Рисунок 2.4 – Розрахований і вимірний діаметр променя, визначений як 95% амплітуди в фокусованому та колімованому профілі як функція частоти

2.1.5 Підбиття підсумків дифракційного методу дослідження

Індикатриса розсіювання показує, як розподіляється інтенсивність відбитої хвилі в просторі навколо опромінюючого циліндра.

Відстань між двома мінімумами на індикатрисі дозволяє знайти діаметр нитки. Якщо нитка опромінюється двома джерелами, то можна уточнити форму нитки, тобто зовнішні дефекти.

Якщо ми аналізуємо двошарову нитку за асиметрією її індикатриса, то можна судити про те, співвісні шари всередині нитки чи ні. Це стане в нагоді для виявлення внутрішніх дефектів.

2.2 Визначення фізичних властивостей (коефіцієнта заломлення) методом терагерцової спектроскопії в часовій області

2.2.1 Особливості терагерцового діапазону

Терагерцовий (ТГц) діапазон займає проміжне положення між оптичним і мікрохвильовим діапазонами (рисунок 2.5). До природних джерел терагерцового випромінювання відноситься, наприклад, космічне реліктове випромінювання. На високочастотну область терагерцового діапазону припадає теплове випромінювання предметів кімнатної температури. Однак виявлені природні терагерцові джерела не є когерентним, тому його не можна застосовувати для таких завдань, як зв'язок, локація, імінджинг, спектроскопія та ін. До недавнього часу більша частина терагерцового спектру не використовувалася у зв'язку з тим, що були відсутні як джерела, так і приймачі когерентного випромінювання цього діапазону. Тому терагерцовий участок електромагнітного спектра назвали «терагерцовим провалом». Прикладені значні зусилля, щоб заповнити цей провал. на рисунку 2.5 показана нижня частотна межа лазерних методів генерації випромінювання і верхня частотна межа роботи електронних приладів. Видно, що терагерцовий провал зімкнувся в кінці 90-х років[14].

Незважаючи на складність генерації терагерцового випромінювання, його унікальні властивості стимулюють освоєння терагерцового діапазону. Перелічимо деякі відмінні особливості терагерцового випромінювання та витікання з них.

Терагерцове випромінювання є неіонізуючим, на відміну від рентгеновського випромінювання, використовуваного в медичній діагностиці. Водночас, різні біотканини володіють істотно різними поглинаннями в цьому діапазоні, що дозволяє забезпечити контрастність знімків. Однак надзвичайно високе забруднення водою не дозволяє терагерцевому випромінюванню проникнути глибоко в тканини, що обмежує область його застосування поверхні тканини.

У порівнянні з видимим і ГЧ випромінюванням, терагерцове випромінювання є довговолновим, отже воно менш піддається розсіюванню. В результаті, в цьому діапазоні прозорі багато сухих діелектричних матеріалів, таких як тканини, дерево, папери, пластмаси. Тому терагерцове випромінювання можна використовувати для неруйнівного контролю матеріалів, сканування в аеропортах і ін. У той же час довжина хвилі випромінювання досить мала, щоб забезпечити субмікронне просторове розподілення при використанні вільно поширюваного випромінювання. При використанні методів ближнього поля може бути досягнуто просторовий дозвіл порядку нанометрів.

В терагерцовому діапазоні лежать резонанси обертальних і коливальних переходів багатьох молекул. Це дозволяє провести ідентифікацію молекула по їх спектральному «відбитку пальців». У поєднанні з отриманим зображенням (іміджингом) в терагерцовому діапазоні це дозволяє визначити не тільки форму, але і склад досліджуваного об'єкта.

Терагерцове випромінювання може бути протектовано у часовій області (рисунок 2.5), т.т. може бути виміряна як амплітуда, так і фаза поля. Це дозволяє напряду вимірювати вносимий досліджуваним об'єктом здви́г фази, а значить, дозволяє досліджувати швидкопротекаючі процеси і навіть керувати ними[15]✂

§

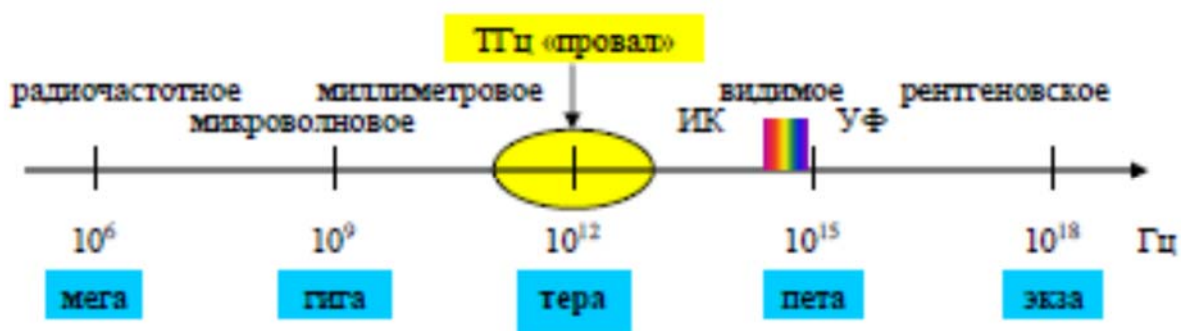


Рисунок 2.5 – Спектр електромагнітних хвиль і терагерцовий «провал»

2.2.2 Принцип дії терагерцових спектрометрів в часовій області

Оскільки терагерцова спектроскопія у часовій області використовується в основному для характеристики матеріалів, велика кількість літератури присвячено питанням виділення параметрів, тобто розрахунку оптичних параметрів досліджуваних матеріалів за їх терагерцовими спектрами пропускання. Як і інші спектрометри, вимірювання терагерцової спектроскопії у часовій області вимагають порівняння між даними, записаними зі зразком, розміщеним на шляху променя, та еталонними даними, записаними з вилученим зразком. Перші вимірювання діелектричних проникностей матеріалів були продемонстровані незабаром після винаходу терагерцової спектроскопії у часовій області.

Принцип роботи терагерцового спектрометра показаний на рисунку 2.6.

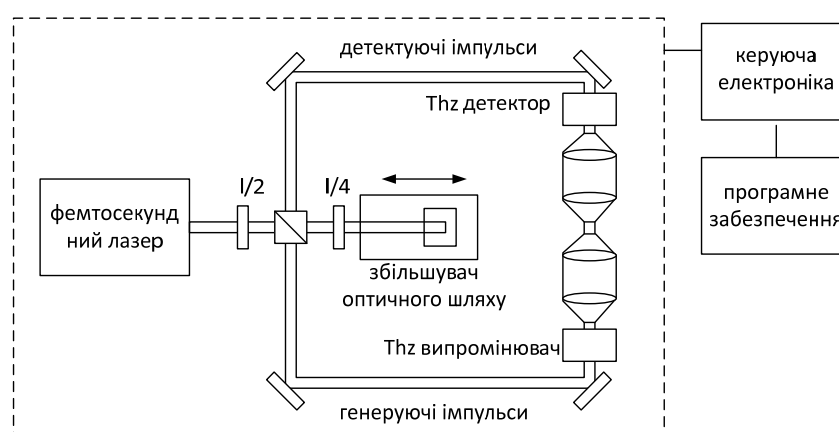


Рисунок 2.6 – Терагерцова спектрометрична установка

У цьому спектрометрі лазерний промінь поділяється на два промені: генеруючий і детектуючий. Ці промені проходять різні оптичні шляхи до випромінюючої та приймальної антен відповідно. Один оптичний тракт має змінну довжину для контролю затримки імпульсу, що надходить на відповідну антену (рисунку 2.6). Після того, як імпульс генерується в випромінюючій антені, «виявлений» імпульс дозволяє відповідній антені виміряти напруженість електричного поля. Змінюючи оптичну затримку, вимірювання проводяться в потрібний час. Пізніше з цих моментів часу за допомогою перетворення Фур'є

отримують частоти. Коли досліджуваний зразок поміщають в прилад, прийнятий сигнал змінюється. Для отримання інформації про властивості матеріалу порівнюють два отримані спектри.

2.2.2.1 Детектування методом електрооптичного стробування

Електрооптичне стробування ґрунтується на ефекті, зворотному оптичному випрямленню – ефекту Поккельса, який полягає у зміні показника заломлення середовища в оптичному діапазоні в присутності зовнішнього електричного поля (у даному випадку поля терагерцового імпульсу). У методі електрооптичного стробування поле терагерцового імпульсу змінює орієнтацію еліпсоїда показників заломлення електрооптичного кристала (кристал стає двопроренезаломлюючим). При проходженні через кристал лінійно поляризованого зондувального імпульсу спільно з терагерцовим імпульсом, поляризація зондувального імпульсу стає еліптичною в результаті різного набігу фаз для звичайної та незвичайної хвилі. Величина еліптичності (пропорційна величині терагерцового поля) може бути зареєстрована за допомогою поляризаційного аналізатора (наприклад, призми Волластона). Зазвичай два пучки різних поляризацій, отримані за допомогою аналізатора, детектується двома фотодіодами. Реєстрація сигналу різниці з діодів дозволяє придушити шуми лазера і збільшити корисний сигнал вдвічі (в порівнянні з сигналом одного діода).

Термін «стробування» означає, що терагерцеве поле вимірюється на короткій ділянці його перекриття з ультракоротким оптичним імпульсом, який і ставить часовий строб, тобто «ворота», для вимірювання терагерцового поля. Оскільки терагерцеве поле змінюється повільно проти тривалості фемтосекундного лазерного імпульсу, можна вважати, що при електрооптичному стробуванні детектується квазіпостійне електричне полі. (При цьому ми припускаємо, взаємна затримка зондувального і терагерцового імпульсів в кристалі невелика, тобто можна вважати, що зондувальний імпульс взаємодіє з однією і тією ж ділянкою терагерцового при їх поширенні через всю товщу кристала.) Для того щоб виміряти іншу ділянку

терагерцового імпульсу, змінюють часову затримку зондувального імпульсу на потрібну величину. Скануючи затримку, набувають всю хвильову форму (осцилограму) терагерцового імпульсу.

2.2.3 Основні співвідношення

Отже, існує потреба в швидких алгоритмах обробки даних, які витягають максимальну кількість інформації з вимірних даних у реальному часі. Особливо велике значення має точне визначення геометричної товщини досліджуваного зразка. Для цього завдання існує два традиційних підходи. Перший – це метод, заснований на часу прольоту, де часова затримка між опорним імпульсом і імпульсом, що поширюється через зразок, використовується для визначення товщини оптичного зразка. Якщо відомі ТГц параметри досліджуваного матеріалу, то можна оцінити геометричну товщину зразка. Щоб ще більше підвищити точність цієї процедури, можна застосувати множинний регресійний аналіз, де вимірний еталонний імпульс послаблюється та зсувається за часом для найкращого перекриття із сигналом вимірювання зразка. Використовуючи обмежену кількість ітерацій, ця оцінка працює в квазиреальному часі. Інший підхід, що працює в частотній області, використовує складну чисельну оцінку параметрів спектрального оптичного матеріалу. Аналізуючи ефект Фабрі-Перо, можна одночасно визначити показник заломлення, коефіцієнт поглинання та товщину зразка. Однак, незважаючи на те, що кількість інформації, отриманої за допомогою цієї процедури, є незрівнянно більшою, обчислювальні зусилля, необхідні для оцінки, значно перевищують часопролітні підходи, оскільки кожену точку відбору зразків спектрів потрібно аналізувати окремо для кількох припущених товщин.

2.2.3.1 Зображення за часом прольоту

Повна форма хвилі ТГц записується для кожного пікселя під час візуалізації імпульсної хвилі ТГц. Якщо два ТГц імпульси відбиваються від двох поверхонь,

розташованих на різних глибинах, відбиті ТГц імпульси мають різні часові затримки через різні оптичні шляхи. З часу затримки можна отримати інформацію про глибину кожного пікселя i , таким чином, представити топографічний профіль цілі. Цей метод отримання зображень називається зображенням часу прольоту хвиль ТГц. На рисунку 2.7 показана концепція часопролітного зображення.

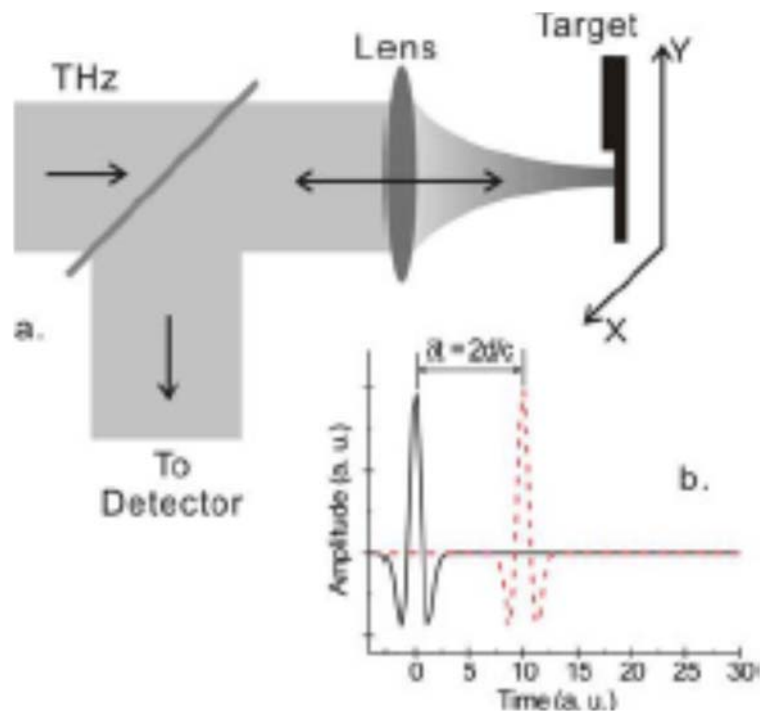


Рисунок 2.7 – Концепція часопролітного зображення ТГц-хвилі. Вставка показує часову затримку між двома сигналами ТГц

Глибина роздільної здатності у зображенні часу прольоту хвилі ТГц обмежена часовою роздільною здатністю при вимірюванні форми хвилі ТГц, яка в принципі пов'язана з довжиною хвилі ТГц. Фактична глибинна (часова) роздільна здатність, яку можна отримати експериментально, зазвичай менша за центральну довжину хвилі ТГц. Коли використовуються ТГц імпульси з центральною довжиною хвилі 2 ТГц, найменша роздільна здатність за глибиною може становити кілька мікрон. Хоча часопролітне зображення забезпечує 3D топографічний профіль або шарову структуру цілі, воно зазвичай не вважається повним методом 3D зображення, оскільки воно не може надати внутрішню інформацію цілі[16]. На рисунку 2.7

показано зображення часу прольоту хвилі ТГц для зразку, яке показує топографічний профіль поверхні та структуру шару всередині зразка.

2.2.3.2 Визначення коефіцієнта заломлення зразка за ефектом Фабрі Перро

Основним рівнянням терагерцової спектроскопії є залежність показника заломлення від різних параметрів, у тому числі від товщини зразка.

$$n(\omega) = n_0 - \frac{c}{\omega l} \arg\{H(\omega)\}, \quad (2.19)$$

де c – швидкість світла;

l – товщина зразка;

n_0 – коефіцієнт заломлення у повітрі;

ω – кутова швидкість;

H – співвідношення подане нижче

$$H(\omega) = \frac{4n(\omega)n_0}{[n(\omega) + n_0]^2} \exp\left\{-k(\omega)\frac{\omega l}{c}\right\} \exp\left\{-j[n(\omega) - n_0]\frac{\omega l}{c}\right\}, \quad (2.20)$$

$k(\omega)$ – коефіцієнт згасання.

$$\arg\{H(\omega)\} = -[n(\omega) - n_0]\frac{\omega l}{c}. \quad (2.21)$$

Показники заломлення навколишнього вільного простору та діелектрика позначаються $\hat{n}_0=1$ і \hat{n}_s відповідно. Крім того, $E_0(\omega)$ – падаюча хвиля; θ_i – кут падіння; θ_t – кут заломлення. Відстань поширення l_θ визначається з товщини зразка

l і дорівнює $l/\cos(\theta_t)$. Стрілки показують проміжні шляхи розповсюдження, згруповані в передачу, 1, 2, 3,..., і відбиття, 1', 2', 3'... (рисунку 2.8).

На рисунку 2.8 показано, що промінь $E_0(\omega)$, який входить справа зверху під деяким кутом до поверхні зразка частково відбивається (1 на рисунку), а частково проходить крізь зразок до протилежної грані зразка, де він розділяється на два промені, той який відбився, йде в напрямку правої грані, другий промінь який вийшов через напівпрозору стінку зразку наліво (1'), далі відбувається аналогічним чином розділення променя на правій грані з отриманням променя 2 і променя, який прямує до лівої грані і т. ін.

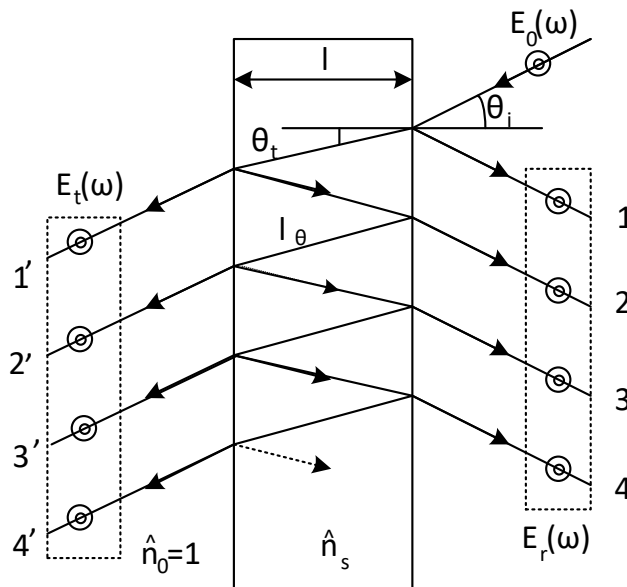


Рисунок 2.8 – Модель поширення хвилі в однорідній діелектричній пластинці

Під час просування шляхом відбиття накопичуються коефіцієнти відбиття та коефіцієнти передавання. Визначення коефіцієнта передавання τ та відбиття ρ для хвилі яка падає з вільного простору

$$\tau = \frac{2}{1 + \hat{n}_s}, \quad \rho = \frac{1 - \hat{n}_s}{1 + \hat{n}_s} \quad (2.22)$$

Визначення коефіцієнта передавання τ' та відбиття ρ' для хвилі яка падає та відбивається від другого боку зразка

$$\tau = \frac{2\hat{n}_s}{\hat{n}_s + 1}, \quad \rho = \frac{\hat{n}_s - 1}{\hat{n}_s + 1} \quad (2.23)$$

Таким чином,

шлях відбиття

множник

1	ρ	
2	$\tau\tau'\rho' \exp\left[-2j\hat{n}_s \frac{\omega l}{c}\right]$	
3	$\tau\tau'\rho'^3 \exp\left[-4j\hat{n}_s \frac{\omega l}{c}\right]$	
4	$\tau\tau'\rho'^5 \exp\left[-6j\hat{n}_s \frac{\omega l}{c}\right]$	
5	...	(2.24)

Аналогічні формули існують для шляху передавання.

У випадку нормального падіння, де $\theta_i = 0$, всі шляхи передачі (відбиття) перекриваються і $l_\theta = l$. Таким чином, загальна передана хвиля є результатом складання хвиль всіх проміжних шляхів передачі.

$$\begin{aligned} E_t(\omega) &= \tau\tau' \cdot \exp\left[-j\hat{n}_s(\omega) \frac{\omega x}{l}\right] \cdot \\ &\cdot \left\{ 1 + \rho'^2 \cdot \exp\left[-2j\hat{n}_s(\omega) \frac{\omega x}{l}\right] + \rho'^4 \cdot \exp\left[-4j\hat{n}_s(\omega) \frac{\omega x}{l}\right] + \dots \right\} \cdot E_0(\omega) = \\ &= \tau\tau' \cdot \exp\left[-2j\hat{n}_s(\omega) \frac{\omega x}{l}\right] \cdot FP(\omega) \cdot E_0(\omega) \end{aligned} \quad (2.25)$$

де $FP(\omega)$ представляє ефект Фабрі-Перо як наслідок відбиття всередині зразка і подається як

$$\begin{aligned}
 FP(\omega) &= \left\{ 1 + \rho'^2 \cdot \exp[-2j\hat{n}_s(\omega)] + \rho'^4 \cdot \exp[-4j\hat{n}_s(\omega)] + \dots \right\} = \\
 &= \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \rho'^2 \cdot \exp[-2j\hat{n}_s(\omega)] \right\}^m = \\
 &= \left\{ 1 - \rho'^2 \cdot \exp[-2j\hat{n}_s(\omega)] \right\}^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Для товстих зразків часові криві демонструють добре розділені відбиття (рисунок 2.9). Основна ідея методу полягає у часовому вікні принаймні двох ехо-сигналів терагерцового імпульсу, викликаних багаторазовими відбиттями в зразку, і для здійснення процесу визначення для кожного з цих відлунь, тоді у нас буде більше рівнянь, ніж невідомих. Цей метод передбачає, що поглинання зразка досить низьке, щоб дозволити існування кількох спостережуваних відлунь. Крім того в цих публікаціях представлено метод, який покращує визначення оптичних констант шляхом одночасного з визначенням коефіцієнта заломлення визначення товщини зразка також. На рисунку 2.9 показані відбиття[17].

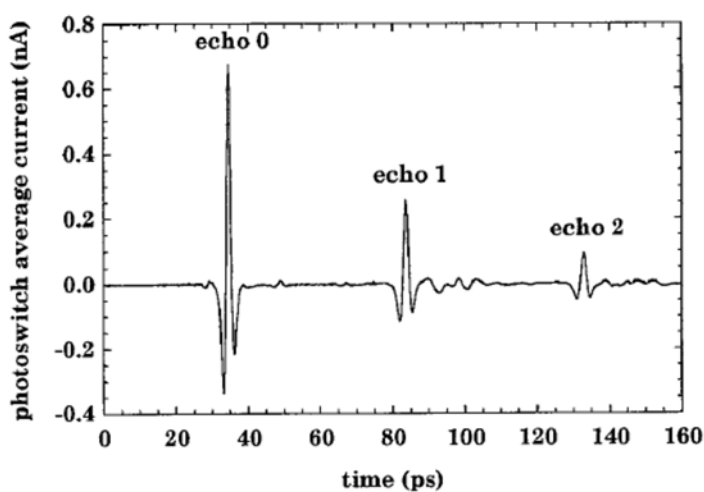


Рисунок 2.9 – Терагерцові імпульси, що передаються через пластину з LiNbO_3 товщиною 1,1 мм з поляризацією, паралельною повільній оптичній осі

На рисунку 2.10 показані відбиття, які відповідають інтерференційним членам, тобто з цього можна зробити важливий висновок, що відбиття об'єктивно існують, їх можна виміряти і в подальшому використовувати в визначенні параметрів.

Для оптично тонких зразків накладання між послідовними відбиттями не дозволяє розбити терагерцовий сигнал, що передається через зразок, на його послідовні ехо-сигнали. Однак ефективну товщину зразка можна визначити з частотної кривої. Дійсно, коли визначається комплексний показник заломлення зразка за умов помилкової товщини, і показники заломлення, і криві поглинання представляють штучні коливання в залежності від частоти[18]. Такі коливання можна побачити на рисунку 2.10.

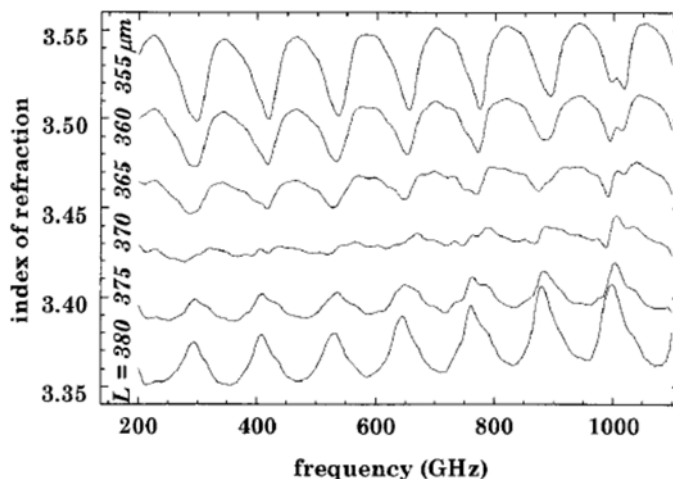


Рисунок 2.10 – Показник заломлення кремнію для різних розрахункових товщин зразка

2.3 Висновки до розділу 2

В розділі 2 було розглянуто модель і метод визначення геометричних властивостей (діаметра) дифракційним методом.

Досліджено індикатриса розсіювання в декартових та полярних координатах та знайдено математично форму волокна. Також математично знайдено геометричні властивості досліджуваного об'єкта.

Було визначено фізичні властивості (коефіцієнта заломлення) методом терагерцової спектроскопії в часовій області. Математично знайдено особливості терагерцового діапазону. Визначено, що терагерцове випромінювання може бути продетектовано у часовій області, тобто може бути виміряне як амплітуда, так і фаза поля.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЛАДІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРАГЕРЦОВОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ, ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВОКИ

3.1 Прилади та програмне забезпечення, які випускаються фірмами

Багато пластикових матеріалів прозорі для терагерцових хвиль. Імпульсні терагерцові системи дозволяють безконтактно вимірювати товщину.

Багато полімерних матеріалів виглядають – певною мірою – прозорими для терагерцового випромінювання, властивість, яку успішно використовують для безконтактного аналізу та неруйнівного контролю (рисунок 3.1). Імпульсне терагерцове випромінювання надає інформацію про товщину об'єкта, навіть у багат шарових зразках, за допомогою методів вимірювання часу прольоту: інтерфейс кожного шару відображає частину падаючого імпульсу, а час, що минув між надходженням імпульсу «відлуння» від будь-якої сторони прямо пропорційний оптичній товщині цього шару.



Рисунок 3.1 – Терагерцеве зображення виявляє приховані бульбашки повітря в полімерних матеріалах.

Застосування терагерцового випромінювання для перевірки пластику не обмежується лише вимірюванням товщини. Сканування зразка за допомогою терагерцового променя перетворює одновимірний профіль на тривимірне зображення, яке точно визначає підповерхневі тріщини, порожнечі та відшарування. Спектроскопічні методи визначають коефіцієнт поглинання і показник заломлення складних матеріалів, виявляють їх склад і внутрішню структуру. Потенціал терагерцових технологій для контролю якості та процесів у виробництві пластмас здається майже необмеженим.

Розглянемо популярні фірми та їх пристрої терагерцової перевірки.

3.1.1 Компанія Torptica Photonics AG

ТОРПІСА пропонує повні системи та компоненти для терагерцової генерації у часовій області: TeraFlash-pro встановлює нові стандарти щодо динамічного діапазону, пропускної здатності та швидкості вимірювання. Поєднуючи інтелектуальну лазерну технологію FemtoFiber від ТОРПІСА з найсучаснішими антенами InGaAs, система досягає максимального динамічного діапазону 100 дБ і пропускної здатності понад 6 ТГц. Нова опція «Dual» забезпечує одночасну роботу двох пар випромінювач-приймач. Пристрій TeraFlash-pro зображено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд пристрою TeraFlash pro.

ТОРТІСА надає різноманітні надшвидкісні волоконні лазери для дослідників, які працюють із фотопровідними перемикачами на основі GaAs або випромінювачами з органічних кристалів. Усі лазери мають чудові характеристики. Завдяки використанню надійної технології дзеркала поглинача, що насичується, для блокування режиму, вони пропонують роботу під ключ і не потребують будь-якого механічного вирівнювання. Нова версія «Dual» забезпечує одночасну роботу двох випромінювачів і/або двох приймачів. Технічні характеристики наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики TeraFlash pro / Dual

Технічні характеристики	TeraFlash pro / Dual
Спектральний діапазон	0,1 – 6 ТГц (тип. 6,5 ТГц)
Спектральний піковий динамічний діапазон	100 дБ
Корисна довжина тракту в терагерцах	15 – 110 см, регулюється за допомогою програмного забезпечення (стаціонарна затримка)
Компоненти	Один фемтосекундний лазер Доставка оптоволокна SM/PM 2 ступені механічної затримки (стаціонарна / рухома) 2 (опціонально 4) фотопровідні перемикачі InGaAs Електроніка для збору даних
Довжина хвилі лазера	1560 нм

Продовження таблиці 3.1 – Технічні характеристики TeraFlash pro / Dual

Ширина лазерного імпульсу	80 нм
Терагерцовий випромінювач*	РСА-TD-250-RX-1: фотопровідний перемикач InGaAs/InP зі смужковою антеною, 2,5-метровий волоконний пігтейл
Терагерцовий приймач*	РСА-TD-250-RX-1: фотопровідний перемикач InGaAs/InP з дипольною антеною, 2,5 м оптоволоконна косичка
Комплект антени	Циліндричний, Ø 25 мм, інтегрована кремнієва лінза та волоконна косичка SM/PM
Кількість каналів (пар антен)	2
Діапазон сканування	5 – 1000 пс, програмне керування
Швидкість сканування	166 трас/с (5 ps) 95 трас/с (20 ps) 60 трас/с (50 ps) 6 трас/с (200 ps) Можливі проміжні налаштування
Середня терагерцова потужність	30 мкВт
Динамічний діапазон у часовій області	100 дБ
Корисна довжина тракту в терагерцах	15 – 110 см, регулюється за допомогою програмного забезпечення (стаціонарна затримка)

Продовження таблиці 3.1 – Технічні характеристики TeraFlash pro / Dual

Роздільна здатність по частоті макс. діапазон сканування	1,0 ГГц
Інтерфейс комп'ютера	Ethernet
Програмне забезпечення	Включено графічний інтерфейс на основі LabView
Розмір	180 x 450 x 560 мм ³
Вага системи	20 кг
Робоча напруга	110 / 220 В змінного струму

На рисунку 3.3 зображено принципову схему пристрою TeraFlash pro.

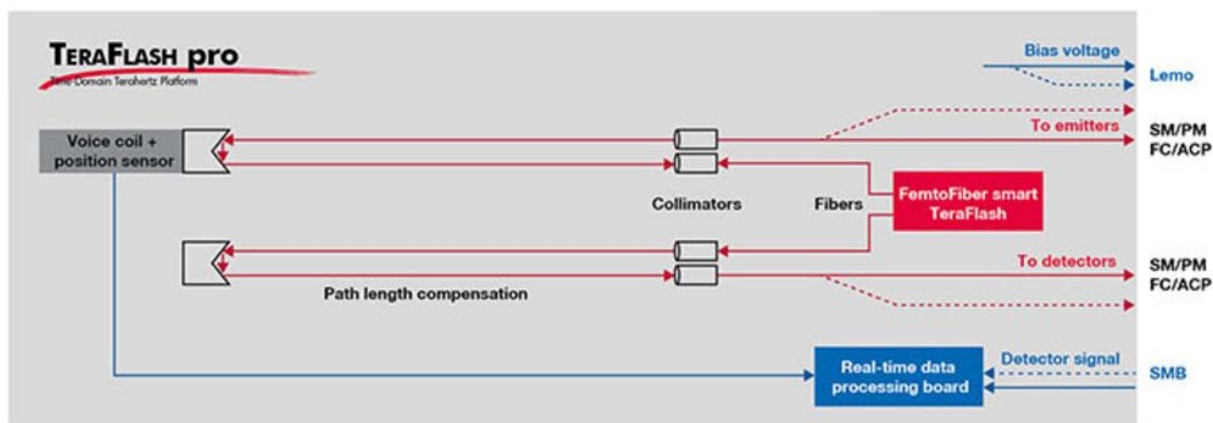


Рисунок 3.3 – Принципова схема TeraFlash pro. Сині лінії зображують електричні сигнали, червоні – оптичні.

ТОРТИСА пропонує два розширення для обробки зображень, сумісні з TeraFlash pro.

Перша версія («Complete Imaging Extension») використовує два точні лінійні етапи для сканування зразка через фокус терагерцового променя. Користувачі

можуть швидко переналаштувати оптику з передачі на геометрію відбиття і навпаки. Друга версія («Flexible Imaging Extension») містить компактну відбиваючу головку, яка рухається на алюмінієвій рамі. Цю конструкцію можна розташувати горизонтально, вертикально або під будь-яким похилим кутом, тому вона добре підходить для вивчення важких об'єктів, зокрема картин і фресок. На рисунку 3.4 зображено розширення Flexible Imaging Extension.

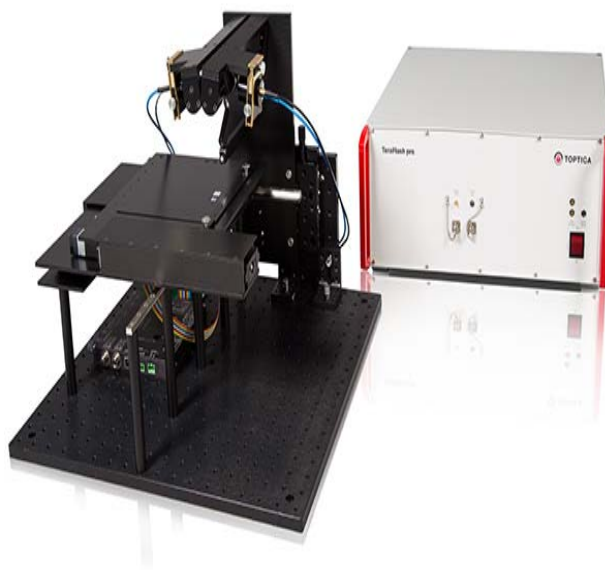


Рисунок 3.4 – Розширення Flexible Imaging Extension для TeraFlash pro.

Розглянемо антени InGaAs які використовуються для терагерцової генерації в пристрої TeraFlash pro.

Імпульсна терагерцова генерація з передовою технологією: антени InGaAs забезпечують потужність близько 30 мкВт і смугу пропускання 6 ТГц. Модулі випромінювача та детектора, розроблені Інститутом Фраунгофера Генріха-Герца (Берлін/Німеччина), комплектуються силіконовою лінзою та волокном SM/PM. Новий трансивер поєднує в собі випромінювач і приймач в одному корпусі, що дозволяє вимірювати відбиття при вертикальному падінні. Усі пристрої можна використовувати з TeraFlash pro, але також доступні як окремі модулі.

На рисунку 3.5 зображено антени InGaAs, а в таблиці 3.2 наведено технічні характеристики антени.



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд антени InGaAs які використовуються з TeraFlash pro

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики антени InGaAs

Технічні характеристики	Фотопровідні перемикачі
Терагерцовий випромінювач	Фотопровідний перемикач InGaAs/InP зі смужковою антеною
Терагерцовий приймач	Фотопровідний перемикач InGaAs/InP з дипольною антеною
Терагерцовий трансивер	Комбінований модуль випромінювач + приймач
Смуга пропускання випромінювача/приймача	6 ТГц (> 4 ТГц з трансивером)
Напівпровідниковий матеріал	Багатошарова структура InGaAs та InAlAs на InP
Довжина хвилі	1,5 мкм

Продовження таблиці 3.2 – Технічні характеристики антени InGaAs

Середня терагерцова потужність	30 мкВт при потужності лазера 20 мВт
Пакет	Циліндрична, інтегрована кремнієва лінза та волоконний пігтейл SM/PM Модулі випромінювач/приймач: Ø 25 мм, довжина 34 мм. Трансивери: Ø 30 мм, довжина 111 мм
Рекомендовані умови експлуатації	Потужність лазера 20 мВт середня Макс. зсув +100 В (уніполярний, емітер), ± 3 В (приймач, тільки для тестування)

3.1.2 Компанія VATOP optoelectronics

Настільна система TDS компанії VATOP optoelectronics призначена для терагерцової спектроскопії. Спектральний діапазон до 3,5 ТГц за допомогою волоконного лазера. Додаткова продувка видавлення азотом для зразків. Установка зображена на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд настільної системи TDS.

Система TDS включає:

- закритий відсік для зразків із вільним простором ТГц для вимірювань передачі;
- лінійний каскад для максимальної затримки часу 500 пс (відповідає роздільній здатності 2 ТГц);
- генератор імпульсів, підсилення сигналу та фіксуючий детектор інтегровані в один пристрій;
- ноутбук із програмним забезпеченням T3DS для легкого налаштування спектрометра та збору даних;
- внутрішнє відділення для зразків можна продути азотом.

Також додатково:

- зовнішня оптоволоконна установка для вимірювання передачі, відбиття або зображення продемонстрована на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Зовнішня оптоволоконна установка для вимірювання передачі, відбиття або зображення, а) додаткові зовнішні оптоволоконні антени, б) відсік для зразків

В таблиці 3.3 наведено специфікація TDS.

Таблиця 3.3 – Специфікація TDS.

Спектральний діапазон	0,05 – 3,5 ТГц (лазер 780 нм) 0,05 – 2,5 ТГц (лазер 1040 нм) 0,05 – 2 ТГц (лазер 1550 нм)
Динамічний діапазон	> 60 дБ (лазер 780 нм) > 60 дБ (лазер 1040 нм) > 50 дБ (лазер 1550 нм)
Діапазон сканування	500 пс (роздільна здатність 2 ТГц)
Діаметр променя (ТГц)	22 мм (колімований промінь) / 1-3 мм (сфокусований промінь)
Розмір зразка	55 x 55 мм (колімований промінь) / > 5 x 5 мм (сфокусований промінь)
Напруга живлення	100-240 В, 50/60 Гц
Розміри спектрометра	60 см x 60 см x 25 см
Маса спектрометра	50 кг

На рисунку 3.8 наведено приклад вимірювання в ТГц спектрі за допомогою TDS10XX-wol.

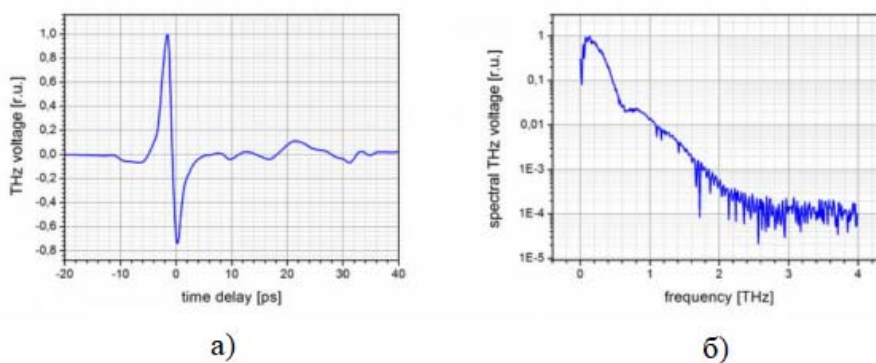


Рисунок 3.8 – Приклад вимірювання в ТГц спектрі за допомогою TDS10XX-wol, а) часова затримка, б) частота виміру в терагерцовому спектрі.

Програмне забезпечення T3DS розроблене компанією BATOP optoelectronics має ряд переваг:

- швидке та просте налаштування спектрометра та параметрів відбору проб;
- окремі вимірювання базової лінії, еталонного спектру та спектру зразка;
- крокове вимірювання ТГц сигналу для високого співвідношення сигнал/шум;

– опція вимірювання зображень включена в пакет програмного забезпечення.

Інтерфейс програмного забезпечення T3DS зображено на рисунку 3.9.

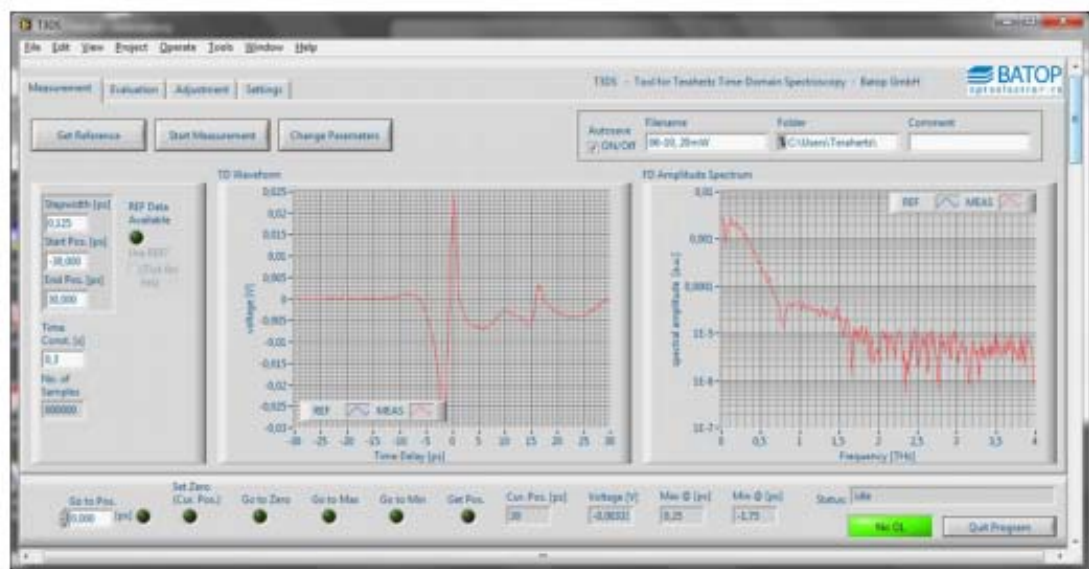


Рисунок 3.9 – Інтерфейс програмного забезпечення T3DS.

Розглянемо установку пристрою на макеті (рисунок 3.10). Усі компоненти попередньо зібраного терагерцевого (ТГц) спектрометра в часовій області (TDS) монтується на макетній платі. Всю систему необхідно закріпити на оптичному столі за допомогою чотирьох затискачів, що входять до комплекту. Рекомендовані інструменти для налаштування:

- картка лазерного огляду;
- інфрачервоний переглядач;
- вимірювач оптичної потужності;
- мультиметр.

Ретельне налаштування має вирішальне значення, оскільки лазерний промінь має бути абсолютно паралельним руху лінії затримки. Крім того, дуже важливо, щоб лазерний промінь був добре колімованим. В іншому випадку діаметр лазерного променя не відповідатиме вибраним асферичним лінзам, встановленим на антенах вільного простору або коліматорах для волоконно-з'єднаних антен. Перш ніж запустити попередньо зібрану систему TDS, вам потрібно підключити спектрометр:

- до ноутбука та джерела живлення за допомогою кабелів;
- система збору даних (DAQ) (> NI-USB) і лінія затримки (> активний COM-порт);
- диспетчер пристроїв.

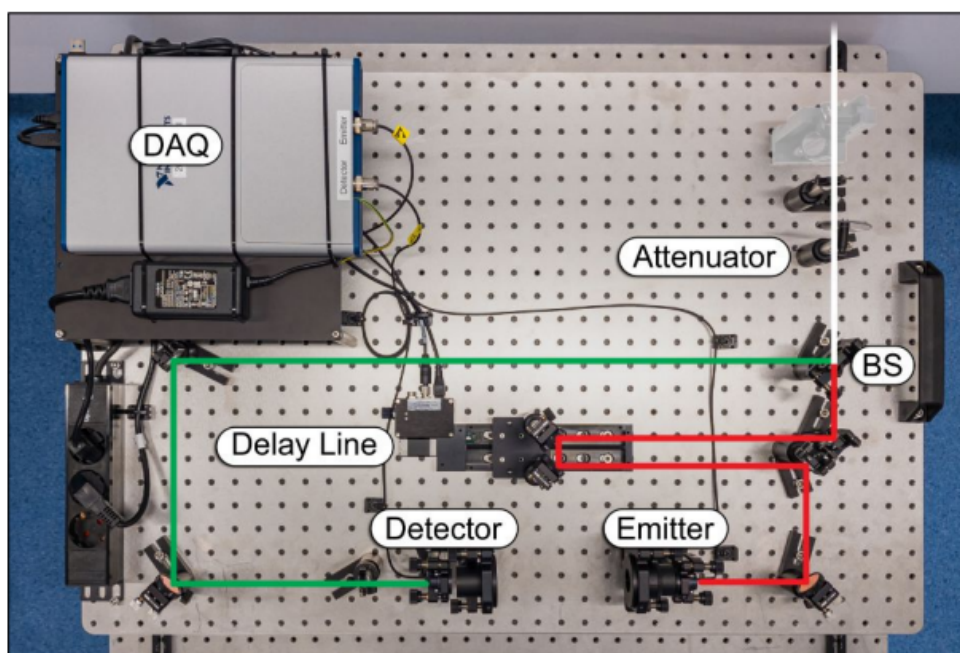


Рисунок 3.10 – Установочний макет пристрою.

Попередньо зібрана система TDS постачається з двома отворами для вирівнювання лазера. Висота лазерного променя над дошкою становить близько 100 мм. Беручи до уваги висоту дошки для хліба (включно з ніжками), потрібно встановити висоту променя лазера приблизно на 187 мм над оптичним столом.

Для подальшого точного налаштування траєкторії лазерного променя потрібно розташувати оптичний вимірювач потужності за другою апертурою та

максимізувати рівень потужності, вирівнявши вхідний лазерний промінь. Коли рівень потужності досягає максимуму, ваш лазерний промінь колінеарний до того, який використовується для попереднього вирівнювання системи TDS.

Щоб оптимізувати волоконно-з'єднані антени, необхідно підключити оптичний вимірювач потужності до волоконного коліматора.

3.1.3 Компанія Hübner Photonics

Продукти T-SPECTRALYZER компанії Hübner Photonics були розроблені для швидкого застосування та для рутинних вимірювань у щоденній аналітичній роботі.

Терагерцовий спектометр T-SPECTRALYZER T/R/F – це універсальний спектрометр, який забезпечує повністю автоматизовані вимірювання в геометрії пропускання та/або відбиття на лотку для зразків, а також можливість використання зовнішнього оптоволоконного зв'язку ТГц головки.

Особливості продуктів T-SPECTRALYZER:

- терагерцові хвилі для безпечного та швидкого сканування;
- інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс для підтримки запису, обробки та експорту результатів вимірювань;
- терагерцові хвилі для безпечного аналізу, без контакту;
- зручний, повністю автоматизований.

Для огляду обрано спектометр T-SPECTRALYZER F так, як він є найновішою моделлю та найбільш удосконаленою версією серед цієї лінійки пристроїв.

T-SPECTRALYZER F – це оптоволоконний ТГц-спектрометр із підтримкою Plug & Play. Доступні індивідуальні рішення щодо передачі, відбиття та варіантів оптоволоконного сполучення та їх комбінацій. Зовнішній вигляд пристрою зображено на рисунку 3.11.

T-SPECTRALYZER F забезпечує неруйнівний і безконтактний аналіз зразків за допомогою оптоволоконної установки. Спектометр забезпечує повністю автоматизовані вимірювання в геометрії пропускання і/або відбиття.

Особливості T-SPECTRALYZER F:

- терагерцові хвилі для безпечного та швидкого сканування;
- 0,1 – 2,5 ТГц і динамічний діапазон до 54 дБ;
- короткий час вимірювання 0,05 с;
- інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс для підтримки запису, обробки та експорту результатів вимірювань.

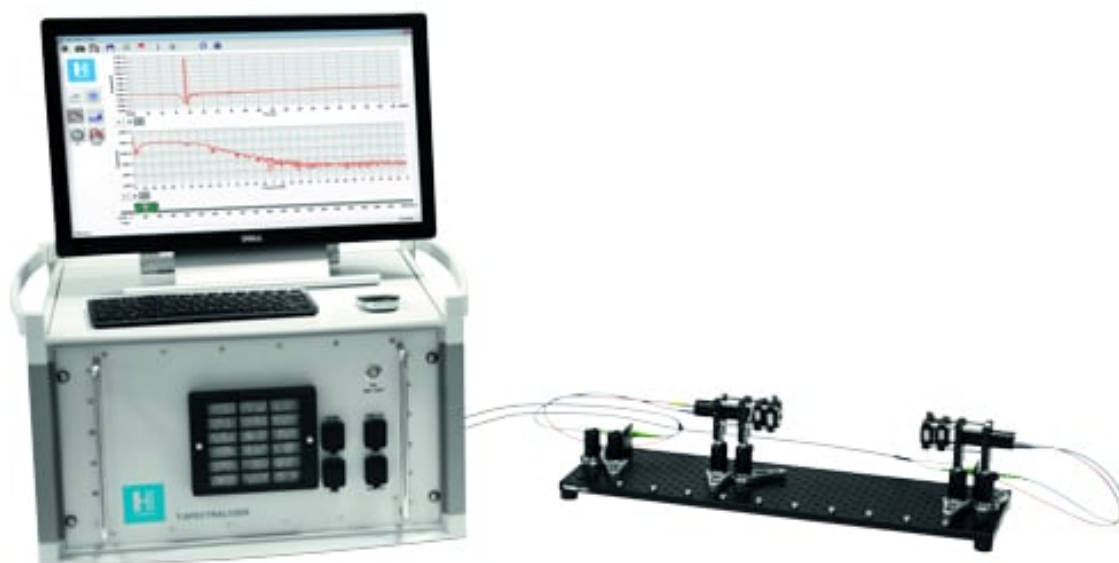


Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд T-SPECTRALYZER F.

Технічні характеристики T-SPECTRALYZER F наведено в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики T-SPECTRALYZER F

Діапазон частот:	0,1 ТГц до 2,5 ТГц (33 см^{-1} до 133 см^{-1})
Динамічний діапазон:	$> 54 \text{ дБ}$ на 0,5 ТГц ($16,7 \text{ см}^{-1}$)
Роздільна здатність по частоті:	Стандарт: 10 ТГц (діапазон 100 пс) ; Максимум: 5 ТГц (діапазон вимірювання 200 пс).

Продовження таблиці 3.4 – Технічні характеристики T-SPECTRALYZER F

Час вимірювання:	Стандарт: 5 с (100 пс при 20 пс/с); Максимум: 0,05 с (100 пс при 2000 пс/с).
Діапазон сканування зразка/діаметр променя:	Стандарт: 200 x 200 мм ² ; Діаметр балки: ~ 1,5 мм (залежно від частоти)
Розміри та вага (стійка 19 дюймів):	Розмір: 43 x 27 x 46 см ³ ; Вага: 30 кг.
Модуль терагерцового передавача/детектора (кожен)	Розмір: 5 x 5 x 10 см ³ ; Вага: по 0,5 кг.
Навколишнє середовища та електроживлення	Робоча температура: 16–32°C (60–90°F); Робоча напруга: 115 – 230 В змінного струму; Частота: 50 – 60 Гц; Споживана потужність: менше 200 Вт

На рисунку про спектральний сигнал та шум а також інформація залежності від часу зображено на рисунках 3.12 та 3.13.

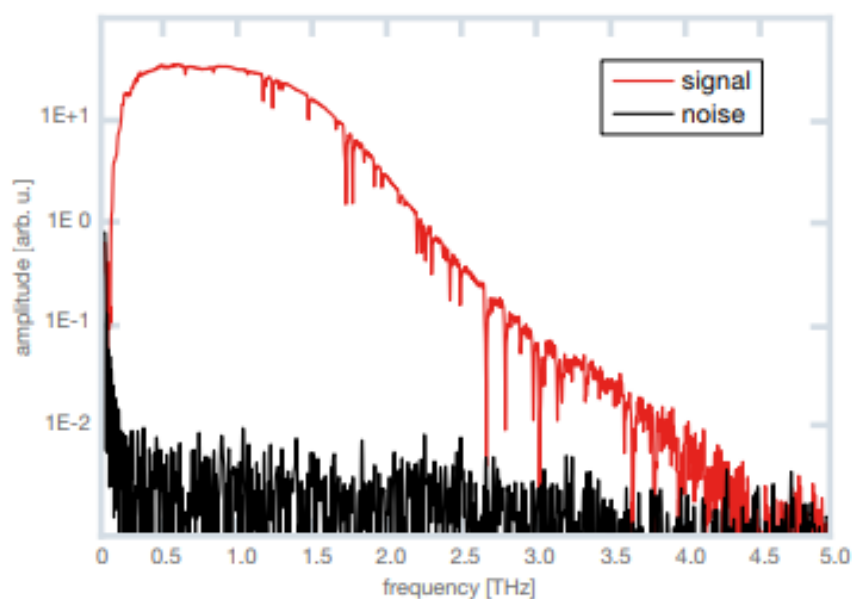


Рисунок 3.12 – Інформація про спектральний сигнал і шум

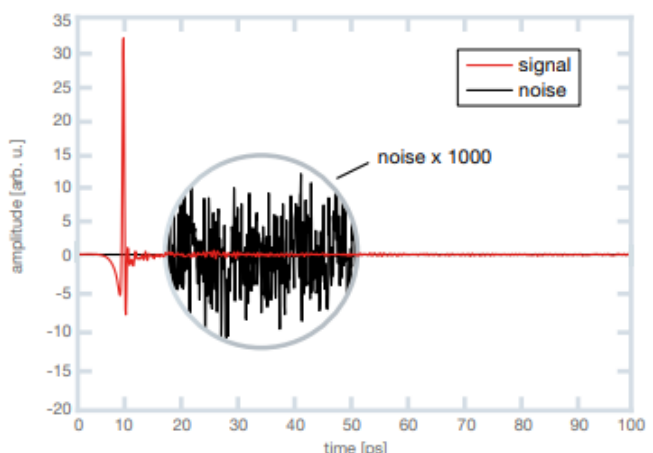


Рисунок 3.13 – Залежність від часу інформації про сигнал і шум

Короткий час вимірювання 0,05 с дозволяє контролювати процеси або просторове відображення зразків. Стандартизовані апаратні та програмні інтерфейси допомагають інтегрувати спектрометр у уже існуючу мережу та процес. Ніяких заходів безпеки не потрібно, оскільки терагерцові хвилі абсолютно безпечні.

Модулі з якими підтримує роботу терагерцовий спектрометр T-SPECTRALYZER F:

- оптоволоконні модулі передавача та детектора;
- оптоволоконний трансиверний модуль;
- оптоволоконний модуль ATR.

3.1.4 Програмне забезпечення TeraLyzer компанії MenloSystem

TeraLyzer – це перше у своєму роді програмне рішення для вилучення параметрів матеріалу з даних спектроскопії в терагерцевій часовій області в геометрії передачі. Він надає високоточну інформацію про складні параметри матеріалу зразка (n , α , κ , ϵ' , ϵ''), включаючи шкали похибок і розрахункову товщину зразка.

Однією з переваг програмного забезпечення TeraLyzer є те, що тонкі зразки в режимі менше 100 мкм стають доступними для досліджень без необхідності

встановлення диференціальних вимірювань. Крім того, аналіз багатошарових систем сприяє новому спектру експериментів.

Можливості програми TeraLyzer:

- ТГц спектроскопія з часовим розрізненням у геометрії пропускання;
- дослідження зразків менше 100 мкм товщиною до кількох мм;
- характеристика невідомих шарів у багатошаровій системі;
- недоступні зразки, наприклад в кріостаті.

Особливості програми TeraLyzer:

- широкосмугова програма;
- екстракція товщини зразка;
- вилучення оптичних параметрів (n , α , κ , ϵ' , ϵ'');
- поширення статистичної помилки;
- імпорт і попередня обробка даних;
- корекція динамічного діапазону;
- поглинаючі зразки.

Програмне забезпечення TeraLyzer містить численні процедури, що дозволяють досліджувати тонкі зразки товщиною від кількох мм до 100 мкм. На першому етапі дані передачі імпортуються та готуються для оцінки попереднім процесором. По-друге, дістається товщина зразка. Нарешті, оцінюються оптичні параметри (n , α , κ , ϵ' і ϵ'') разом зі смугами похибок.

Спектральна залежність показника заломлення наведена на рисунку 3.14

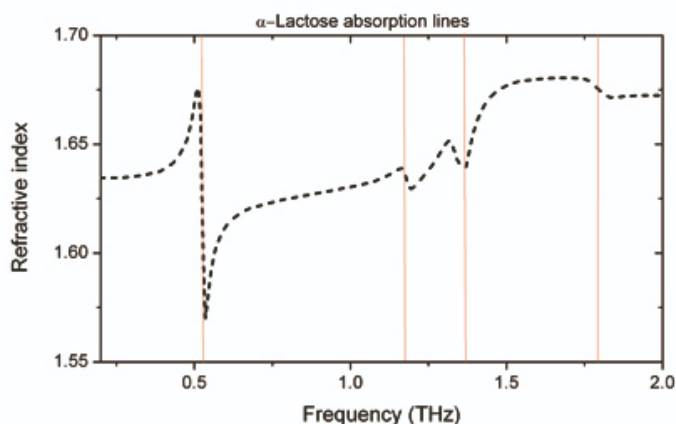


Рисунок 3.14 – Спектральна залежність показника заломлення

Після оцінки даних виводять комплексні оптичні параметри, як представлено нижче на прикладі сполуки α -лактози та поліпропілену. У спектрі поглинання чітко виявляються різкі резонансні особливості (рисунок 3.15).

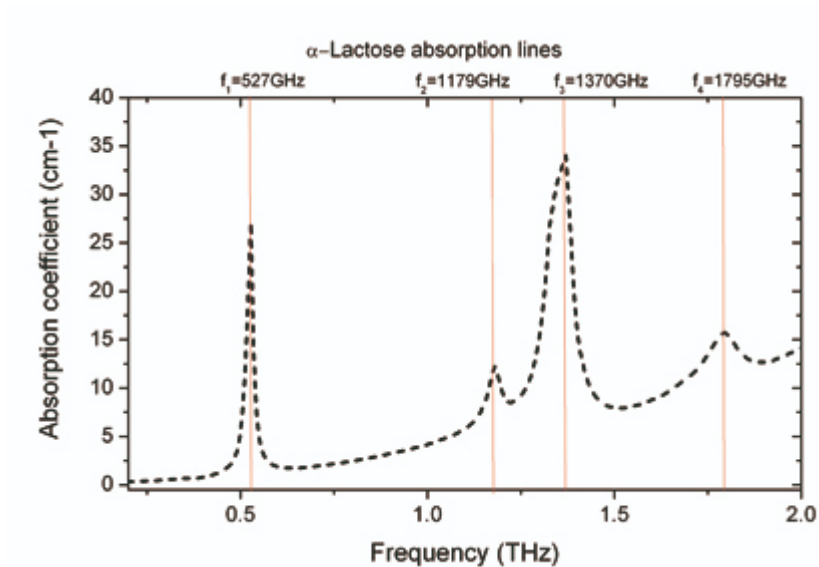


Рисунок 3.15 – Резонансні особливості спектру поглинання

Товщина зразка одночасно витягується з оцінених даних за допомогою будь-якого з двох найсучасніших підходів, що враховують відображення Фабрі-Перо: метод квазіпростору і метод повної варіації. Тонкі зразки в діапазоні менше 100 мкм можна охарактеризувати без труднощів у стандартній експериментальній установці. На рисунку 3.16 показано показник заломлення та отриману товщину тонкої плівки РА6 28 мкм:

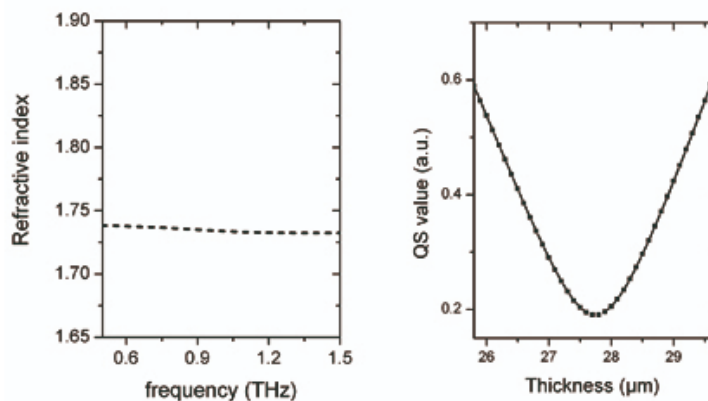


Рисунок 3.16 – Показник заломлення та отримана товщина тонкої плівки РА6

Точне визначення товщини також можливо, навіть якщо зразок недоступний, наприклад, усередині кріостата. Крім того, TeraLyzer також підтримує характеристику багат шарових зразків. Навіть зразки з високим поглинанням можуть бути виміряні завдяки врахуванню динамічного діапазону. Інтерфейс описаного вище програмного забезпечення TeraLyzer компанії MenloSystem наведено на рисунку 3.17.

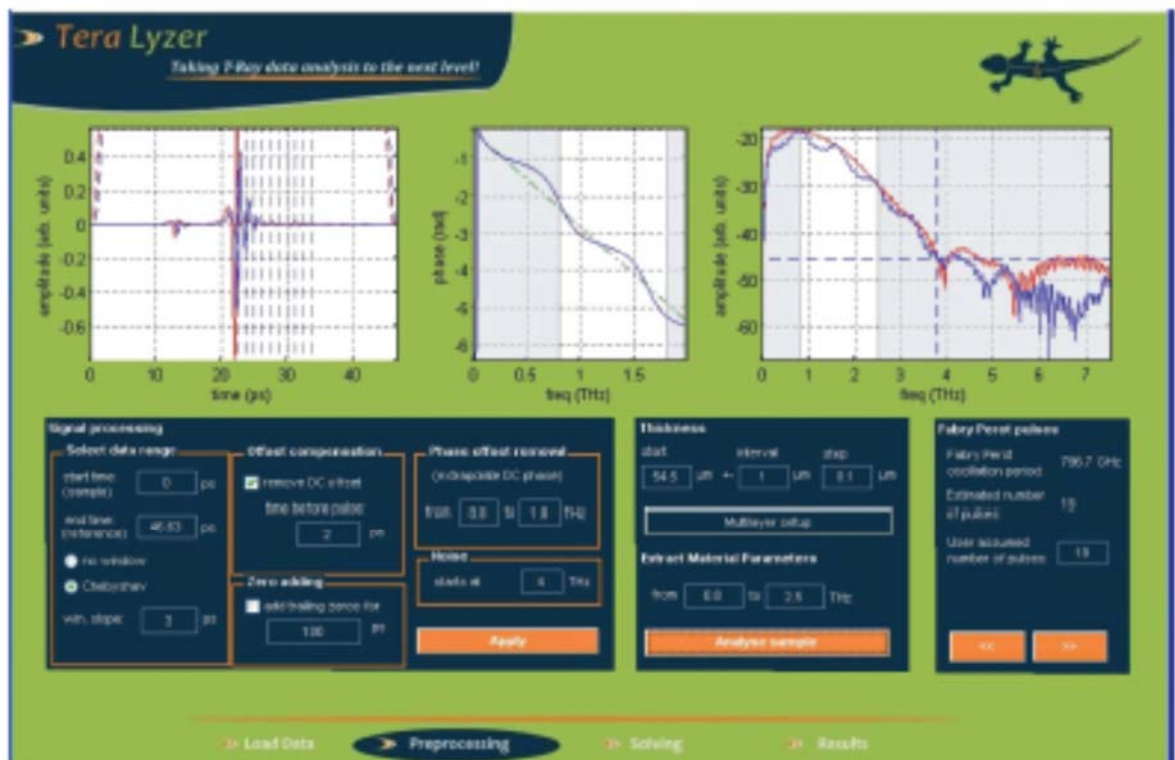


Рисунок 3.17 – Інтерфейс описаного вище програмного забезпечення TeraLyzer компанії MenloSystem

3.2 Експеримент з використанням дифракційного методу для визначення діаметру

Використовуючи розглянутий вище дифракційний метод було проведено експеримент для визначення діаметру чотирьох досліджуваних об'єктів: однієї волосини та трьох різних за діаметром проводів.

Перед початком проведення експерименту виконаємо підготовку та розглянемо елементи необхідні для його проведення.

3.2.1 Джерело випромінювання

Як джерело світла був застосований зелений напівпровідниковий лазер. Також можна використовувати лазерну указку.

Лазер виконаний із авіаційного алюмінієвого сплаву, є міцним.

Обраний лазер має високу потужність, тому він буде працювати від акумулятора не довго. Не можна тримати лазер на постійній основі ввімкненим протягом більше 20 секунд, так як є вірогідність спалити установку. Заборонено наводити даний лазер на живих створінь, так як його потужність може бути шкідливою для зору.

Характеристики лазеру:

- довжина хвилі 530 нм;
- стиль променя – безперервна лінія;
- вихідна потужність менше 1МВт;
- робоча температура – від + 15 °С до + 30 °С;
- температура зберігання – від -10 °С до +40 °С;
- preheat time – менше 3 секунд;
- колір – зелений;
- колір корпусу – чорний/сріблястий;
- вихідна потужність лазер – менше 1 МВт;
- розмір – 16.5 см x 2.5 см;
- ефективний діапазон – від 3000 м до 5000 м.

3.2.2 Оптична система

Вимірювання діаметра тонких протяжних виробів, таких як волокна, нитки, філамент, тонкі дроти тощо, є надзвичайно актуальним завданням. Точний

безперервний технологічний контроль на всіх стадіях виробництва від напівфабрикату до готового виробу є запорукою високої якості продукції, а також економічної рентабельності та конкурентоспроможності виробництва загалом. В силу дуже малих розмірів об'єкта вимірювання в даній області важко застосувати контактні, ультразвукові та інші методи. Найбільш поширеними в даному випадку є оптичні лазерні методи, засновані на нелінійних оптичних ефектах, що дозволяють збільшити роздільну здатність в діапазоні малих діаметрів[20].

Згідно з принципом Бабіне, коли нитка освітлюється паралельним пучком, дифракційний ефект буде таким же, як у щілини, і на екрані, що приймає, отримуються одні і ті ж яскраві і темні смуги. На рисунку 3.18 зображено принцип отримання дифракційних смуг для визначення діаметру.

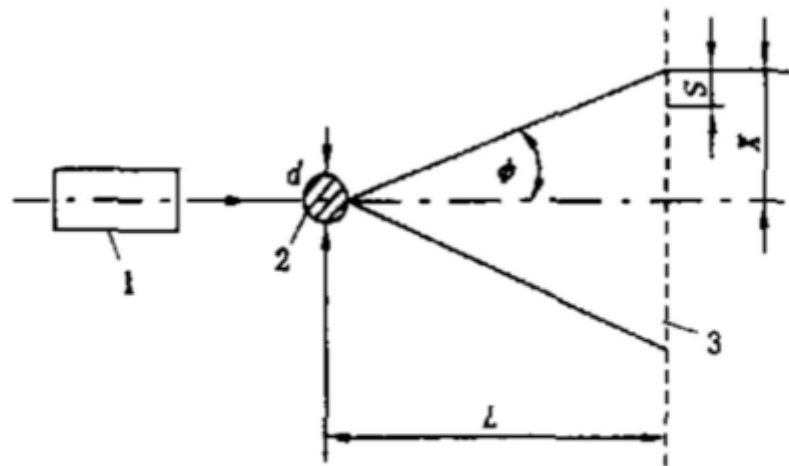


Рисунок 3.18 – Розрахунок діаметра за параметрами дифракційних смуг

Коли відстань від випромінювача до екрану дорівнює $L = \frac{d^2}{\lambda}$, спостерігатиметься дифракція Фраунгофера[21] і розподіл інтенсивності на екрані спостереження визначатиметься виразом

$$I = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin\phi}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi d \sin\phi}{\lambda}\right)^2} \quad (3.1)$$

Діаметр об'єкта розраховуватиметься за такою формулою

$$d = \frac{kL\lambda}{x_k} = \frac{L\lambda}{S} \quad (3.2)$$

де S – інтервал дифракційних смуг;

x_k – відстань від нульового максимуму до максимуму k -го порядку;

λ – довжина хвилі падаючого світла.

Лазер висвітлює вимірюване волокно, за яким формується інтерференційна картина. Для її фіксації застосовано багатoeлементний КМОП сенсор TSL1412S довжиною 100 мм і величиною комірки 40 мкм. Сенсор знаходиться під управлінням налагоджувальної плати DEO на базі FPGA Altera Cyclone.

3.2.3 Багатoeлементний приймач

MPD3728 – це високошвидкісний та високочутливий датчик лінійного зображення CCD (з зарядним зв'язком), який змінює оптичні зображення на електричний сигнал та виконує функцію розділення кольору.

MPD3728 має 3 рядки по 7300 пікселів, і це 2-вивідний / кольоровий CCD-датчик з 2 рядками / кольором регістру перенесення заряду, який передає електрони фотосигналу 7300 пікселів, розділені на парні та непарні пікселі. Підходить для високошвидкісних кольорових цифрових копіювальних апаратів 600 dpi / A3 і т. д.

Особливості MPD3728:

- діючий фотоелемент: 7300 пікселів на рядку, три ряди;
- крок фотоелементу;
- міжстроковий інтервал: 10 мкм;

– роздільна здатність: основні кольори (червоний, зелений та синій), пігментний фільтр (зі світлостійкістю 107 лк на годину): 24 крапки / мм (600 dpi)
Розмір А3 (297 мм× 420 мм) (більш коротка сторона) ;

- рівень тактового сигналу: вихід CMOS під напругою 5 В;
- швидкість передачі: 40 МГц (20 МГц / 1 вихід);
- тип виходу : 2 виходи по фазі / кольору;
- електроживлення : +12 В;
- вбудовані схеми : скидання контурів рівня подачі живлення;

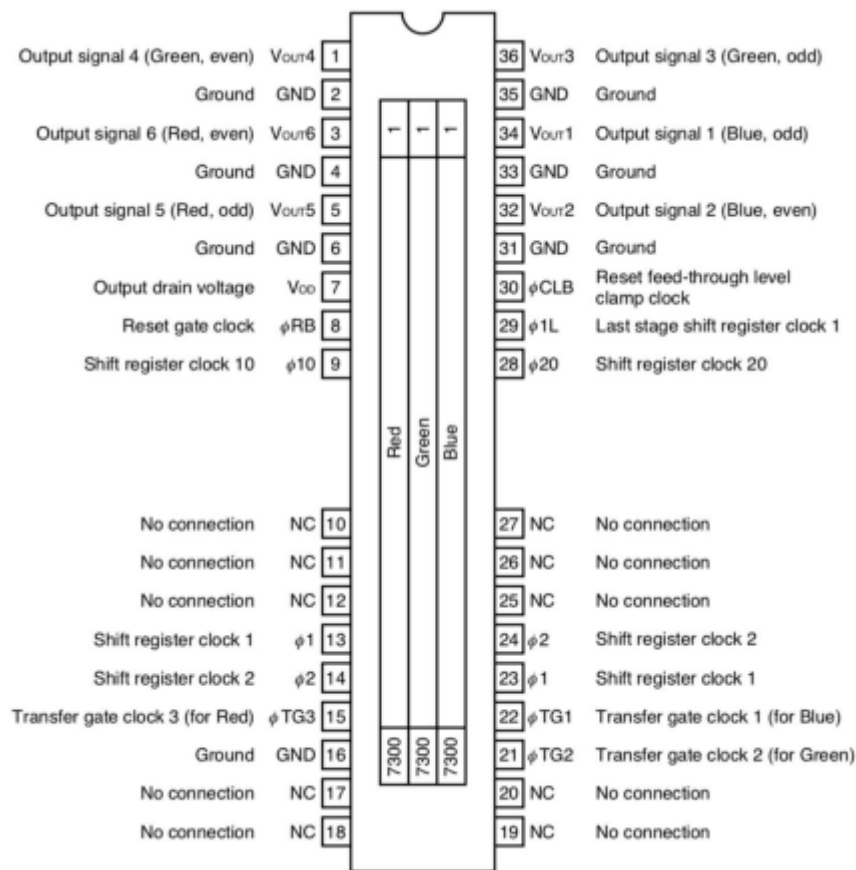


Рисунок 3.19 – Принципова схема MPD3728

3.2.4.1 Експериментальні дослідження

Об'єктами вимірювання є 4 зразки:

- об'єкт 1: волосся (чорне);

- об'єкт 2: дріт;
- об'єкт 3,4: дві частини з одного дроту.

Згідно з принципом Бабіне, коли нитка висвітлюється паралельним пучком, дифракційний ефект на приймаючому екрані буде таким же, як у щілини через яку проходить світло та спостерігаються одні і ті ж яскраві і темні смуги. Тому математичні вирази для розрахунку параметрів тонкої щілини справедливі і для тонких непрозорих об'єктів, таких як тонкі дроти волокна та нитки[22].

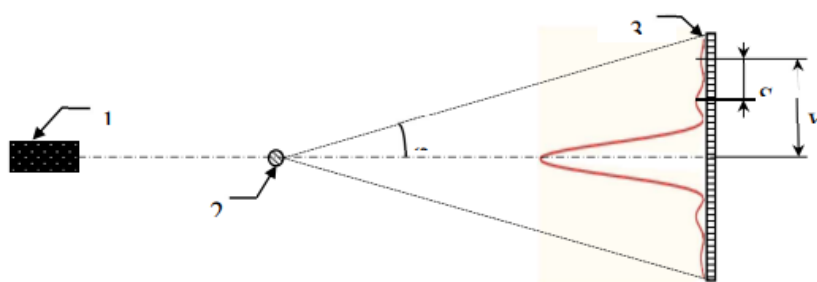


Рисунок 3.20 – Розрахунок діаметра за параметрами дифракційних смуг.

На рисунку 3.20 показана схема лазерного дифракційного перетворювача де:

- 1 – напівпровідниковий лазер;
- 2 – об'єкт контролю з діаметром перерізу d ;
- 3 – площина багатоелементного фотоприймача на якому фіксується дифракційна картина;
- φ – кут дифракції;
- X – відстань від нульового максимуму до максимуму n -го порядку;
- S – відстань між сусідніми максимумами.

Детектувати максимуми першого, другого та наступних порядків у даному перетворювачі важко, тому що їх інтенсивність більш ніж на порядок менша за інтенсивність максимуму нульового порядку. Це вимагає використання багатоелементних приймачів зі значно ширшими динамічними діапазонами і застосування аналого-цифрових перетворювачів з більшою розрядністю, що значно ускладнює і здорожує конструкцію перетворювача[23].

3.2.4.1 Технічна реалізація

На рисунку 3.21 представлена структурна схема перетворюючого пристрою, який реалізує лазерний дифракційний вимірювач тонких волокон. Як джерело випромінювання в установці застосовано лазерний діод потужністю близько 1 мВт і довжиною хвилі 530 нм. Діод висвітлює вимірюване волокно, за яким формується інтерференційна картина. Для її фіксації застосовано багатоелементний КМОП сенсор MPD3728 довжиною 70 мм і величиною комірки 10 мкм. Сенсор знаходиться під управлінням налагоджувальної плати DE0 на базі FPGA Altera Cyclone III.

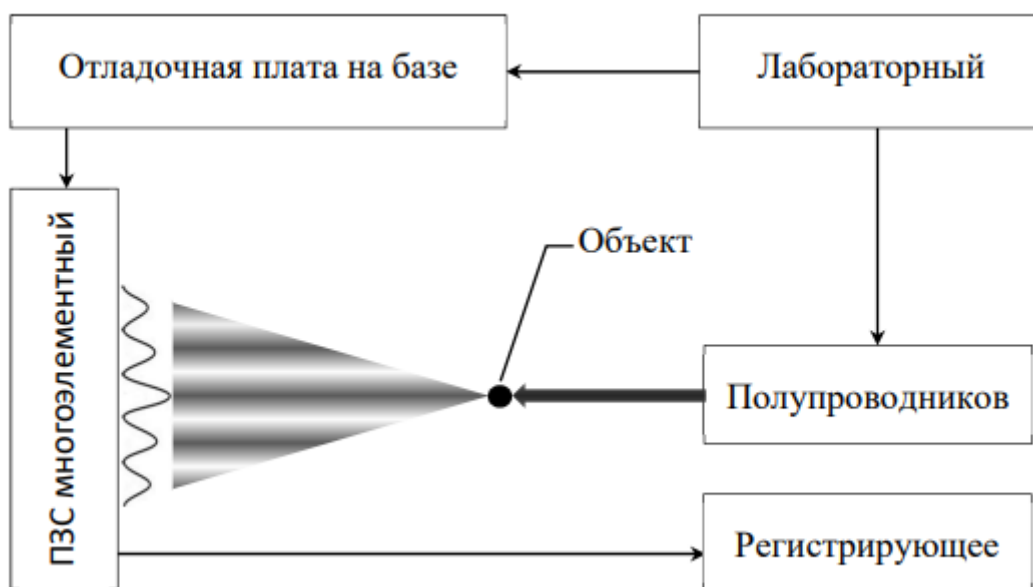


Рисунок 3.21 – Структурна схема макету дифракційного вимірювача

Відеосигнал, що формується багатоелементним приймачем, фіксувався за допомогою осцилографа.

Описаний макет дозволяє інтерпретувати дифракційну картину за взаємним розташуванням мінімумів і максимумів і обчислювати діаметр волокна. Однак проблему представляє центральний максимум, інтенсивність якого виходить далеко за межі динамічного діапазону сенсора. Основна енергія дифракційних смуг,

створюваних дифракцією вимірних ниток, зосереджена у смузі нульового порядку, як показано на рисунку 3.21.

Щоб уникнути насичення ПЗЗ та розширити динамічний діапазон вимірювань дифракційних смуг, реалізовано використання спеціального світлозахисного бар'єру, як зображено на рисунку 3.22 для виключення дифракційного пучка нульового порядку.

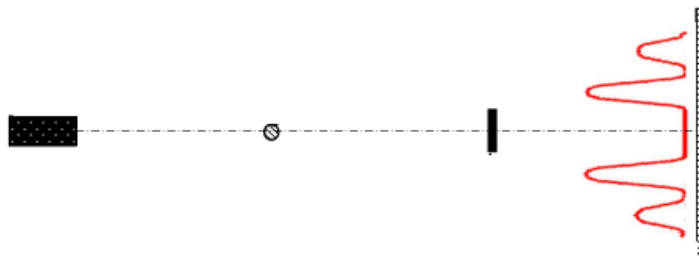


Рисунок 3.22 – Розрахунок діаметра за параметрами дифракційних смуг.

Схема реалізації запропонованого дифракційного перетворювача (рисунки 3.22) включає як і в попередньому випадку напівпровідниковий лазер, об'єкт контролю та багатоелементний приймач. Істотною відмінністю є наявність непрозорого бар'єру, який вирізає з дифракційної картини центральний максимум нульового порядку (рисунки 3.23) з набагато більшою достовірністю визначати положення інших екстремумів і за цими даними розраховувати діаметр об'єкта, що вимірюється.

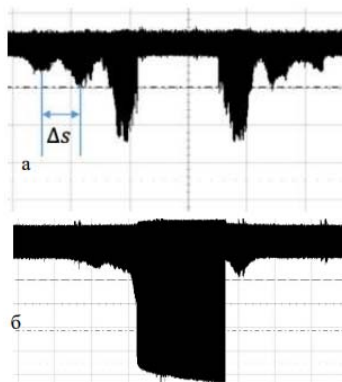


Рисунок 3.23 – Дифракційна картина отримана багатоелементним приймачем:

а) – з непрозорим бар'єром, б) – без непрозорого бар'єру

Як об'єкти для вимірювання та перевірки теорії було взято кілька зразків тонкого дроту та зразок людського волосся. Для еталонних значень зразки були виміряні за допомогою мікроскопу. Вимірювання проводили тричі для кожного зразка з подальшим отриманням середнього значення діаметра. Результати вимірів представлені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати виміру з допомогою мікроскопа.

Об'єкт	Перший раз	Другий раз	Третій раз	Середнє значення
1	0,092 мм	0,095 мм	0,093 мм	0,0933 мм
2	0,039 мм	0,040 мм	0,038 мм	0,039 мм
3	0,052 мм	0,054 мм	0,053 мм	0,053 мм
4	0,054 мм	0,052 мм	0,053 мм	0,053 мм

Далі використовуючи експериментальну установку були отримані параметри дифракційної картини для кожного з експериментальних зразків, зокрема, відстані між сусідніми екстремумами[24].

Використовуючи вимірювані параметри дифракційної картини, був розрахований діаметр для кожного зразка. Дані отриманих вимірів занесено до таблиці 3.6.

Формула для розрахунку діаметру має вигляд

$$d = \frac{L\lambda}{\Delta SK_1 K_2} \quad (3.3)$$

де K_2 – коефіцієнт перетворення та дорівнює 189.6;

λ – довжина хвилі й дорівнює 530 нм;

L – відстань між об'єктом та сенсором та дорівнює 528 мм.

Таблиця 3.6 – Отримані результати з розрахунків з розташування дифракційних екстремумів.

Об'єкт	ΔS_1	ΔS_2	ΔS_3	Середнє значення
1	3,1 (5 кл)	3,2 (5 кл)	3,3 (5 кл)	3,2 (5 кл)
2	3,8 (10 кл)	3,7 (10 кл)	3,9 (10 кл)	3,8 (10 кл)
3	5,6 (5 кл)	5,7 (5 кл)	5,5 (5 кл)	5,6 (5 кл)
4	5,7 (5 кл)	5,6 (5 кл)	5,5(5 кл)	5,6 (5 кл)

У таблиці 3.7 представлена похибка отримана при вимірі зразків дифракційним методом.

Таблиця 3.7 – Результати порівняння вимірювань різними методами (об'єкт 1 – чорне волосся, об'єкт 2, 3 та 4 – мідний дріт)

	ΔS в клітинах	К1 ціна поділу мкс	Діаметр за розрахунком (мм)	Діаметр по мікроскопу(мм)	δ
1	3,2	5	0,0926	0,093	0,43%
2	3,8	10	0,038987	0,039	0,033%
3	5,6	5	0,0529	0,053	0,18%
4	5,6	5	0,0529	0,053	0,18%

Похибка, отримана при порівнянні результатів прямих вимірювань зразків і вимірювань за допомогою запропонованого методу не перевищує 0,2%, що є хорошим узгодженості теоретичних та експериментальних даних, а також про

потенційну застосовність запропонованого методу для проектування приладів для вимірювання протяжних об'єктів з малим діаметром.

3.3 Висновки до розділу 3

В розділі 3 було проведено огляд та аналіз пристроїв для проведення терагерцевої спектроскопії та проведено експериментальне дослідження за допомогою дифракційного методу для знаходження діаметру філаменту.

Проведено огляд пристроїв від компаній Toptica Photonics AG (Gräfelfing), VATOP GmbH (Jena), Hübner GmbH & Co. KG (Kassel) та наведено їх характеристики та особливості. Також описано програмне забезпечення компанії MenloSystem для дослідження та моделювання фізичних властивостей філаменту.

Проведено експериментальне дослідження в якому використовуючи дифракційний метод визначено товщину (діаметр) чотирьох об'єктів (волосини людини та трьох мідних дротів).

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці

Розробка і виконання дипломної роботи проводиться в приміщенні, яке розташоване на 1 поверсі 5 поверхового будинку, несучі стіни і перегородки якого цегляні, розміри приміщення складають 5 x 7 x 2,5 м. У приміщенні 2 вікна площею 10 м².

Електроживлення здійснюється за допомогою трифазної мережі з глухозаземленою нейтраллю напругою 380/220 В частотою 50 Гц.

Лінія електромережі для живлення ПЕОМ виконана як окрема трипровідна мережа, шляхом прокладання фазного, нульового робочого та нульового захисного провідників. Необхідно проводити контроль ізоляції. Контроль проводити між нулем і фазою і між фазами. Опір ізоляції має бути не менше 500 кОм. Контроль проводити не рідше 1 разу на рік при відключеному електроживленні.

Проводиться вступний інструктаж для нових працівників, первинний інструктаж на робочому місці (безпечні прийоми праці, конкретна виробнича обстановка), повторний інструктаж один раз в півріччя, позаплановий інструктаж при введенні в дію нових стандартів, правил; при зміні технологічного процесу, нещасних випадках, цільовий інструктаж.

Проведення всіх інструктажів реєструється у відповідних журналах інструктажу з обов'язковим підписом інструктували та особи, яка інструктує. Журнали інструктажів повинні бути пронумеровані, прошнуровані та скріплені печаткою. При виконанні робіт, не пов'язаних з основною діяльністю, необхідно проводити цільовий інструктаж.

4.2 Виробнича санітарія

Приміщення має природне і штучне освітлення. Зорова робота проектувальника є роботою високої точності (найменший розмір об'єкта розрізнення

0,3 м – 0,5 м). Тоді розряд зорової роботи – III "В". За вимогами ДБН В.2.5-28-2006 величина коефіцієнта природного освітлення (КПО) повинна бути $\geq 1,2\%$, $E_{\min} = 200$ лк. Вікна мають регульовальні пристрої для відкриття, жалюзі.

Робота відноситься до категорії легкої 1а і, згідно з ДСН 3.3.6-042-99 «санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», оптимальні параметри мікроклімату повинні відповідати таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оптимальні параметри мікроклімату

Пора року	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	22–24	40–60	$\leq 0,1$
Тепла	23–25	40–60	$\leq 0,1$

Допустимі рівні звукового тиску і рівні шуму на робочому місці повинні відповідати ДСН 3.3.6-037-99 «санітарні норми шуму, інфразвуку та ультразвуку». Еквівалентний рівень звуку не перевищує 50 дБ.

Робочі місця розташовані щодо світлових прорізів так, щоб природне світло падало зліва. Організація кожного робочого місця забезпечує відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування ергономічним вимогам НПАОП 0.00-1.28-10. Висота робочої поверхні столу для ПЕОМ – 750 мм, ширина столу – 1000 мм, глибина столу – 800 мм. Робочий стіл має простір для ніг висотою не менше 600 мм і шириною не менше 500 мм. План розміщення робочих місць вказано на рисунку 4.1.

Для зменшення дії психофізіологічних ОВПФ слід встановити перерви по 20 хв через 2 години після початку робіт, через 1,5 години і 2,5 години по 20 хв після обідньої перерви. Загальна тривалість перерв (без урахування обідньої) за 8-годинний робочий день становить 60 хв. Під час технологічних перерв

рекомендується виконувати спеціальні вправи для зняття зорового стомлення, розумового перенапруження і статичних перевантажень.

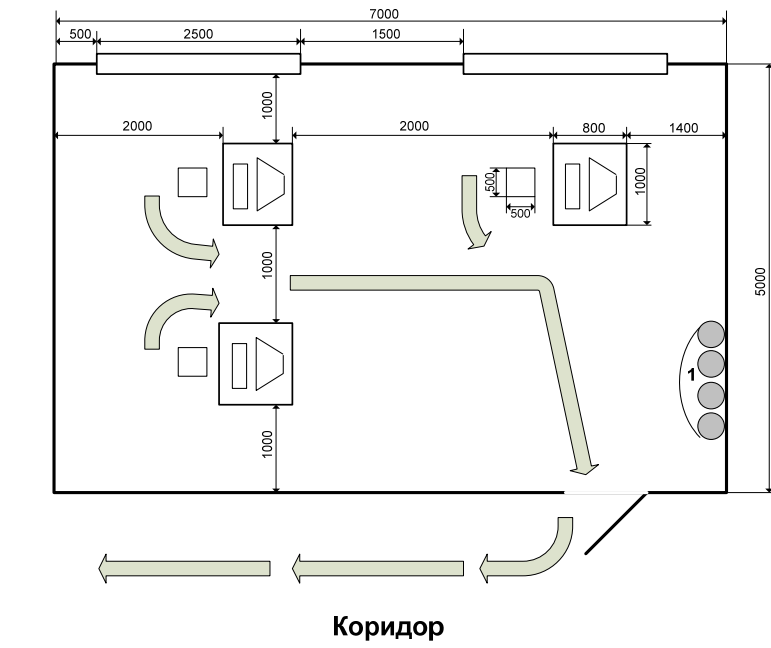


Рисунок 4.1 – План розміщення робочих місць з планом евакуації при пожежі

У приміщенні НДЛ параметри мікроклімату не відповідають нормам. Для забезпечення встановлених норм мікроклімату слід застосовувати кондиціонування. Виконаємо розрахунок кондиціонування.

Джерелами надлишкового тепла в приміщенні є люди, устаткування, штучне освітлення, сонячна радіація, тепло, яке передається через стіни.

Визначаємо кількість тепла, що виділяється працюючими:

$$Q_p = 0,5 \cdot n \cdot q, \quad (4.1)$$

де n – кількість працюючих в приміщенні, $n = 3$;

q – кількість тепла, що виділяється робочим за 1 годину, $q = 120$ ккал/ч (для категорії робіт I а);

$$Q_p = 0.5 \cdot 3 \cdot 120 = 180 \text{ ккал/г}$$

Визначаємо кількість тепла, що виділяється обладнанням:

$$Q_{\text{обор.}} = 860 \cdot N \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2, \quad (4.2)$$

де φ_1 – коефіцієнт використання настановної потужності устаткування;

$$\varphi_1 = 0,85 \text{ (} 0,85 \div 0,9 \text{)};$$

φ_2 – коефіцієнт одночасності роботи устаткування в зміні, $\varphi_2 = 1$ (0,5 ÷ 1);

N – потужність обладнання (кВт), $N = 3$ кВт;

$$Q_{\text{обор.}} = 860 \cdot 3 \cdot 0,85 \cdot 1 = 2193 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо кількість тепла від джерела освітлення

$$Q_{\text{осв.}} = K \cdot E \cdot S, \quad (4.3)$$

де K – питома тепловиділення на 1 люкс освітленості, $K = 0,05$ ккал/лк·м²·г;

E – найменша освітленість приміщення, 300 лк;

S – площа приміщення, $S = 7 \cdot 5 = 35 \text{ м}^2$.

$$Q_{\text{осв.}} = 0,05 \cdot 300 \cdot 35 = 525 \text{ ккал/г}$$

Визначаємо кількість тепла, що надходить через вікна:

$$Q_{\text{солн.}} = s \cdot q \cdot k \cdot k_c, \quad (4.4)$$

де s – площа скління, $s = 10\text{м}^2$;

q – величина сонячної радіації, що передається через 1м^2 скління, що залежить від орієнтування вікон, $q = 130 \text{ ккал} / \text{м}^2 \cdot \text{год}$. (вікна спрямовані на північний схід);

k – коефіцієнт, що залежить від місця розташування, $k = 1,15$;

k_c – коефіцієнт затінення, $k_c = 0,8$.

$$Q_{\text{солн.}} = 10 \cdot 130 \cdot 1,15 \cdot 0,8 = 1196 \text{ ккал/год}$$

Кількість тепла, що надходить в приміщення через стіни $Q_{\text{ст}}$, приймемо рівним нулю, тому що стіни цегляні.

Визначимо сумарну кількість тепла:

$$Q_{\Sigma} = Q_p + Q_r + Q_{\text{обор.}} + Q_{\text{осв.}} + Q_{\text{солн.}} + Q_{\text{ст}} \quad (4.5)$$

Таким чином можемо визначити:

$$Q_{\Sigma} = 180 + 2193 + 525 + 1196 + 0 = 4094 \text{ ккал/год.}$$

Визначаємо необхідний повітрообмін приміщення:

$$L = \frac{Q_{\Sigma}}{C(t_n - t_{\text{пр.}})}, \quad (4.6)$$

де $C = C_{\text{уд.}} \cdot P_{\text{об}}$ – об'ємна теплоємність сухого повітря;

t_n – температура повітря, що видаляється, $t_n = 31 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$t_{\text{пр.}}$ – припливна температура, $t_{\text{пр.}} = 21 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$C_{\text{уд.}}$ – питома теплоємність повітря, $C_{\text{уд.}} = 0.237 \text{ ккал / кг } ^\circ\text{C}$;

$\rho_{\text{об}}$ – об'ємна вага припливного повітря, $\rho_{\text{об}} = 1,205 \text{ кг / м}^3$.

$$C = 0,237 \cdot 1,205 = 0,286 \text{ ккал/м}^3\text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L = \frac{4094}{0,286(31 - 21)} = 1101,12 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Визначаємо необхідну продуктивність кондиціонера на охолодження

$$Q_{\text{хол.}} = LC (t_{\text{нар.}} - t_{\text{пр.}}), \quad (4.7)$$

де $t_{\text{нар.}}$ – зовнішня температура повітря, $t_{\text{нар.}} = 32^\circ\text{C}$.

$$Q_{\text{хол.}} = 1101,12 \cdot 0,286(32 - 21) = 4093,96 \text{ ккал/год.}$$

Система кондиціонування вибирається виходячи з таких умов:

$$\left. \begin{array}{l} L_k \geq L \\ Q_k \geq Q_{\text{хол.}} \end{array} \right\} \quad (4.8)$$

де L_k, Q_k – продуктивність кондиціонера за обсягом і холоду відповідно.

З урахуванням отриманих результатів вибираємо кондиціонер Daewoo, який зможе забезпечити для спекотної пори необхідні повітрообмін і охолодження зовнішнього повітря для підтримки оптимальних параметрів мікроклімату.

Характеристики: Обмін повітря – 1200 м³/год; продуктивність на охолодження – 5,8 кВт, рівень шуму – 32дБ.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Для забезпечення безпеки людей при роботі з комп'ютером в приміщенні слід дотримуватися загальних вимог пожежної безпеки. Причиною пожежі в приміщенні, можуть бути: коротке замикання електропроводки; несправність ПЕОМ та іншого електрообладнання.

Відповідно до вимог приміщення комп'ютерного відділу оснащено:

- димовими пожежними сповіщувачами в кількості 1 датчик (контролює площу до 86 м² по ДБН В.2.5-56-2010);
- вуглекислотними переносними вогнегасниками в кількості 2 штуки (з розрахунку 1 вогнегасник на 3 ПК, але не менше 2 на приміщення), об'ємом 2 л, ВВК-1,4;
- кошма.

При проектуванні і будівництві виробничих і допоміжних будівель промислових підприємств передбачають евакуаційні виходи, призначені для безпечної евакуації знаходяться в будівлі в разі виникнення пожежі або аварії. Ефективність евакуації досягається створенням шляхів евакуації. На евакуаційних шляхах організовано природне і штучне аварійне освітлення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи з теми «Дослідження геометричних та фізичних властивостей філаменту для 3D-друку» було досліджено, які саме та з якого матеріалу бувають філаменти, їх характеристики та популярність в використанні. Проведено розробку основних теоретичних закономірностей та співвідношень, а саме методу визначення геометричних властивостей дифракційним методом та визначення фізичних властивостей (коефіцієнта заломлення) методом терагерцової спектроскопії в часовій області. Досліджено та проаналізовано компанії які випускають продукти терагерцової спектроскопії, проаналізовано їх характеристики та проведено експеримент з використанням дифракційного методу та знайдено товщину (діаметр) чотирьох об'єктів.

Проаналізувавши можливі оптичні методи серед яких метод вимірювання потужності потоку випромінювання, метод вимірювання скануванням, тіньовий метод в квазіпаралельному пучку та дифракційний метод обрано саме диференційний так, як він є найбільш перешкодостійким, легким в експлуатації та найбільш точним серед всіх іншим оптичних методів.

Для вирішення цього завдання найбільш добре підходять інтерференційні методи контролю, які мають більш високу роздільну здатність в даному діапазоні значень, що дозволяють за розподілом дифракційних екстремумів отримувати значення контрольованого геометричного параметра.

Було розглянуто два методи дослідження філаменту:

- тепловий;
- терагерцовий.

Проаналізовано їх принцип роботи, технології їх виконання та особливості використання. Для дослідження філаменту було обрано терагерцовий метод, так як він є більш зручним, гнучким та легшим в виконанні та використанні.

В розділі 2 було розглянуто модель і метод визначення геометричних властивостей (діаметра) дифракційним методом.

Досліджено індикатриса розсіювання в декартових та полярних координатах та знайдено математично форму волокна. Також математично знайдено геометричні властивості досліджуваного об'єкта.

Було визначено фізичні властивості (коефіцієнта заломлення) методом терагерцової спектроскопії в часовій області. Математично знайдено особливості терагерцового діапазону. Визначено, що терагерцове випромінювання може бути продетектовано у часовій області, тобто може бути виміряна як амплітуда, так і фаза поля.

В розділі 3 було проведено огляд та аналіз пристроїв для проведення терагерцової спектроскопії та проведено експериментальне дослідження за допомогою дифракційного методу для знаходження діаметру філаменту.

Проведено огляд компаній Toptica Photonics AG (Gräfelfing), VATOP GmbH (Jena), Hübner GmbH & Co. KG (Kassel) та наведено їх характеристики та особливості. Також описано програмне забезпечення компанії MenloSystem для дослідження та моделювання фізичних властивостей філаменту.

Проведено експериментальне дослідження в якому використовуючи дифракційний метод визначено товщину (діаметр) чотирьох об'єктів (волосини людини та трьох мідних дротів).

Розроблено розділ охорони праці та визначено, що приміщення в якому відбувалася розробка повністю відповідає необхідним вимогам.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ТА ПОСИЛАНЬ

1 ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення» [На заміну ДСТУ 3008-95; чинний від 2015-06-22]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 26 с.

2. К.Ф. Борен, Д.Р. Хаффман, «Поглинання і розсіювання світла малими частинками», Мир, 1986, 664 с.

3. А. О. Натарова, Н. Г. Кокодій, «Вимірювання діаметра оптичних волокон дифракційним методом», 2016 IEEE 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL) стор. 111-114, вересень 2016.

4. Кокодій Н.Г., Натарова А.О. Вимірювання діаметра оптичного волокна дифракційним методом з цифровою обробкою індикатриси світлорозсіювання // Оптика і спектроскопія .

5. Н. Кокодій, М. Кайдаш, І. Жовтоніжко, М. Дубінін Вимірювання діаметра, колірних характеристик і комплексного показника заломлення тонких волокон шляхом комп'ютерного аналізу кольорів на зображенні. У 2021 році IEEE 3rd Ukrainian Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), стор. 74-77, серпень 2021 р.

6. Натарова А.О., Кокодій Н.Г. Методи вимірювання коефіцієнта корисної дії поглинання лазерного випромінювання тонкими дротами та їх комплексного показника заломлення // Український метрологічний журнал, 2015, (4), 18-22.

7. А. О. Натарова, Н. Г. Кокодій., С. Погорєлов, І. Приз «Фізичні методи аналізу властивостей волосся людини», IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), стор. 300-305, вересень 2019 р. .

8. Хорошайло Ю.Є., Сезонова І.К., Хорошайло Е.Ю. Колориметрія // Матеріали CAOL 2005. Друга міжнародна конференція з передової оптоелектроніки та лазерів, вип. 2, стор. 276, вересень 2005 р.

9. Ю. Хорошайло, І. Сезонова, В. Чумаков, С. Єфіменко, Г. Левицька, «Можливість використання концепції колориметричних функцій у прикладних

дослідженнях», 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (2019). CAOL), стор. 225-228, вересень 2019 р.

10. Євгенович К.Ю., Василівна С.А., Миколайович П.О., Миколайович Ю.І., Дмитрович М.А., Анатолійович С.В., Андрійович Г.О. «Використання колориметричного методу для контролю біологічних об'єктів», 2021 XXXI Міжнародний науковий симпозиум «Метрологія та метрологічне забезпечення» (ММА), стор. 1-4 вересня 2021 р.

11. К.Й. Євгенович, М.А. Дмитрович, С.В. Анатолійович, Ю.І. Миколайович, С.А. Василівна, Т.В. Володимирович, С.І. Костянтинівна, «Вимірювання кольору за допомогою електронного колориметра», 2020 XXX Міжнародний науковий симпозиум «Метрологія та метрологічне забезпечення» (ММА), стор. 1-4, вересень 2020 рік.

12. Андросик А.Б., Воробйов С.А., Мирвицька С.Д. «Моделювання діелектричних циліндрів дифракційним методом», Технічні науки – від теорії до практики 19 (2013), С. 109-115.

13. А. А. Воронцов, С. Д. Мирвицька, «Дифракція плоскої хвилі на двошаровому діелектричному циліндрі», Техніка вимірювань, 1996, 39 (4), стор. 389-392 .

14. Зайченко О.Б., Мартиненко Л.Г. Вплив параметрів первинного перетворювача на основі поглинаючої стінки на точність вимірювання параметрів мікрохвильових сигналів і трактів // Радіотехніка. 2011. № 167. С. 14–17.

15. Ю.В. Є. Хорошайло, Н.Я. Зайченко, А. Д. Меньяло, (2019). Аналіз теплофізичних характеристик діелектричних проводів, що використовуються в 3D-принтерах, Вісник НТУ «ХП». Сер. : Електроенергетика та революційна техніка = Вісник Національного технічного університету «ХП». Сер. : Електроенергетика та перетворювальна техніка : підб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХП», 2019,- №1,- С. 74-77.

16. Е. Федоров, Н. Чичеріна, Дж. Тлусті, В. Тузікова, «Методи дифракції діаметра розширених виробів», In Materials Science Forum, Trans Tech Publications Ltd. , 2019, Vol. 942, стор. 97-109.

17. Воронцов А. А., Мировицька С. Д. Збудження діелектричного циліндра точковим джерелом випромінювання. Вимірювальна техніка, 1996, Т.39, №3, С.294-299.
18. Воронцов А.А., Мировицька С.Д. "Ефекти дифракційної діаграми від форми поперечного перерізу в ізоляційному циліндрі", Техніка вимірювання, 1991, том 34, № 8, стор.774-777.
19. Царев, М. В. "Генерація и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами." Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет (2011): 12-48.
20. Naftaly, Mira. Terahertz metrology. Artech House, 2015.
21. Zhang, Xi-Cheng, and Jingzhou Xu. Introduction to THz wave photonics. Vol. 29. New York: Springer, 2010.
22. Peiponen, Kai-Erik, Axel Zeitler, and Makoto Kuwata-Gonokami, eds. Terahertz spectroscopy and imaging. Vol. 171. Springer, 2012.
23. Scheller, Maik, and Martin Koch. "Fast and accurate thickness determination of unknown materials using terahertz time domain spectroscopy." Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 30.7 (2009): 762-769.
24. Nsengiyumva, Walter, et al. "Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review." Composite Structures 256 (2021): 112951.