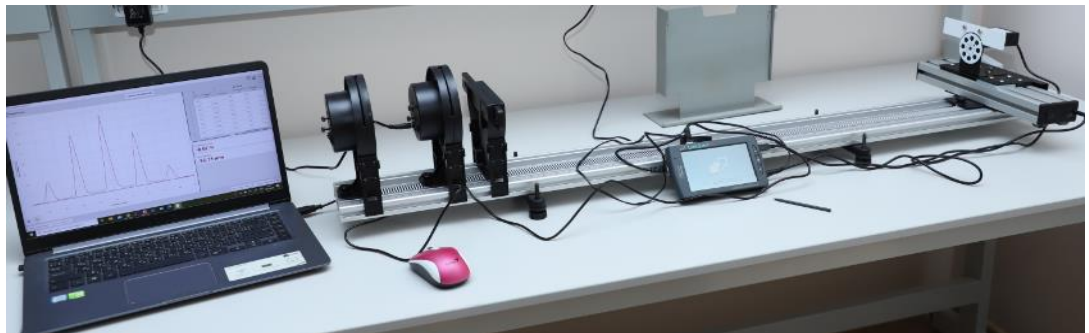


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Фізико-математичний факультет  
Кафедра фізики та методики її навчання

ЕКСПЕРИМЕНТИ З ХВИЛЬОВОЇ ОПТИКИ  
У ЦИФРОВІЙ ЛАБОРАТОРІЇ VERNIER



Посібник до лабораторних робіт з хвильової оптики для студентів спеціальності 014.08 Середня освіта (Фізика та астрономія) – 59 с.

РОЗРОБНИК: Кадченко В.М., доцент кафедри фізики та методики її навчання, кандидат фізико-математичних наук, доцент

РЕЦЕНЗЕНТ: Здешиц В.М., професор кафедри фізики та методики її навчання, доктор технічних наук, доцент

Обговорено та схвалено кафедрою фізики та методики її навчання  
« 19 » \_вересня\_ 2024 р., протокол № \_\_2\_\_

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Микола Слюсаренко

Схвалено радою фізико-математичного факультету  
« 03 » \_жовтня\_ 2024 р., протокол № \_\_2\_\_

**ЗМІСТ**

ОПИС ОБЛАДНАННЯ.....	4
Експеримент 1. ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА. ДОСЛІД ЮНГА.....	17
Експеримент 2. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БІПРИЗМИ ФРЕНЕЛЯ.....	26
Експеримент 3. ВИВЧЕННЯ ДИФРАКЦІЇ ФРАУНГОФЕРА НА ЩІЛИНІ..	32
Експеримент 4. ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ ДИФРАКЦІЙНОЇ ГРАТКИ.....	38
Експеримент 5. ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ МІКРОСКОПІЧНИХ ЧАСТИНОК.....	44
Експеримент 6. ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА. ЗАКОН МАЛЮСА. ФОТОПРУЖНИЙ ЕФЕКТ.....	50
РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА.....	55
ДОДАТКИ.....	56

## ОПИС ОБЛАДНАННЯ

Збір і аналіз експериментальних даних здійснюється за допомогою пристрою LabQuest2 та датчиків фізичних величин (зовнішніх цифрових, аналогових та вбудованих). Характеристики датчиків наведені в інструкціях до лабораторних робіт.

Керівництво з експлуатації LabQuest2 – це детальна інструкція, в якій описуються властивості, апаратне і програмне забезпечення LabQuest2.

### I. АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ LABQUEST 2

#### Кнопка вмикання

- «Увімкнути живлення» (Power on) – якщо екран вимкнений з будь-якої причини, натисніть та відпустіть кнопку вмикання, щоб знову активувати LabQuest. Якщо LabQuest було вимкнено, LabQuest також виконає свою програму початкового завантаження, що займає близько хвилини, а потім відобразить додаток LabQuest.

- Сон/Пробудження (Sleep/Wake) – коли LabQuest увімкнено, натисніть та одразу відпустіть кнопку вмикання, щоб переключити LabQuest в режим сну.

- Відключити (Shut down) – щоб відключити LabQuest, утримуйте кнопку вмикання близько п'яти секунд. LabQuest покаже повідомлення, що сповіщає про відключення програми. Відпустіть кнопку вмикання та почекайте вимикання LabQuest.

- Аварійне відключення – якщо ви утримуєте кнопку відключення близько восьми секунд, LabQuest відключиться неправильно. Це те ж саме, що й вилучення акумулятора з пристрою під час його роботи. Дану процедуру не рекомендують виконувати, доки LabQuest не буде заблоковано, інакше ви можете втратити дані, а також призвести до порушення файлової системи.

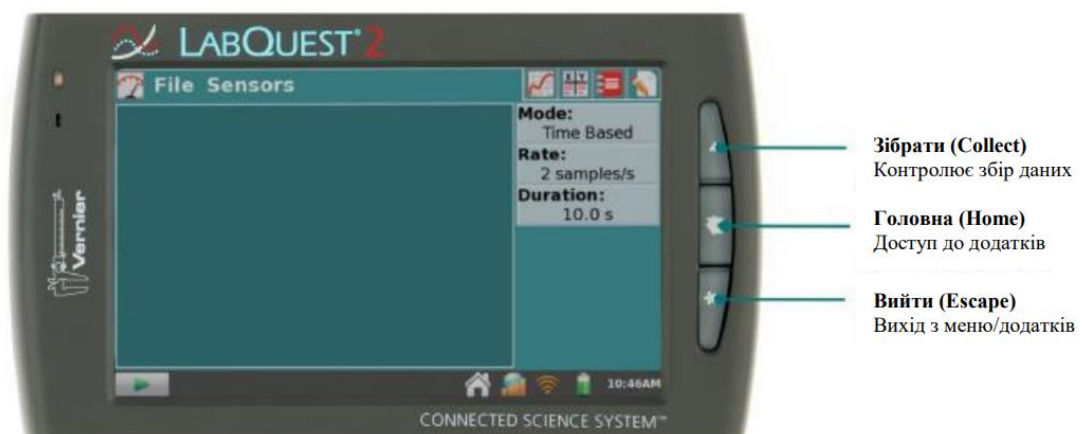
### Сенсорний екран

LabQuest має резистивний сенсорний дисплей з LED-підсвіткою, який швидко реагує на тиск, що чинять на екран. LabQuest загалом контролюється шляхом контактування з екраном. Програмне забезпечення управляється пальцем. У деяких ситуаціях вам може знадобитись більше контролю для точної навігації. У таких випадках ми рекомендуємо використовувати доданий стилус. Якщо у вас виникають труднощі з використанням кольорового екрану або якщо ви використовуєте LabQuest на вулиці під яскравим сонячним світлом, ми рекомендуємо переключитись в режим «Високої контрастності» (High Contrast). Клікніть «Параметри» (Preferences) на екрані «Головна» (Home), потім клікніть «Світло і Потужність» (Light&Power). Оберіть комірку для «Високої контрастності» (High Contrast), щоб активувати цей режим.

### Апаратні кнопки

Окрім сенсорного екрану, ці три апаратні кнопки можна також використовувати для контролю вашого LabQuest.

- Зібрати (Collect) – розпочати та зупинити збір даних в LabQuest App
- Головна (Home) – запустити меню «Головна» (Home), щоб отримати доступ до інших додатків
- Вийти (Escape) – закрити більшість додатків, меню та вийти з діалогових вікон без жодних дій (тобто скасувати діалогові вікна)



## Порти датчиків

LabQuest має три аналогових порти даних (CH 1, CH 2 та CH 3) для аналогових датчиків, таких як Датчик рН, Датчик температур та Датчик сили. Також сюди входять стандартний USB порт для USB датчиків, USB флешок та USB принтерів. Окрім кнопки вмикання верхній край LabQuest має два порти цифровий датчиків (DIG 1 та DIG 2) для Детекторів монітору, датчиків крапельниць та інших цифрових датчиків.



## Внутрішні датчики

LabQuest також має кілька вбудованих датчиків, включаючи GPS, мікрофон, трьохвісний акселерометр, датчик температур та датчик відносного світла. Для підтримки внутрішніх датчиків LabQuest App, оберіть «Налаштування датчика» (Sensor Setup) з меню «Датчики» (Sensors).

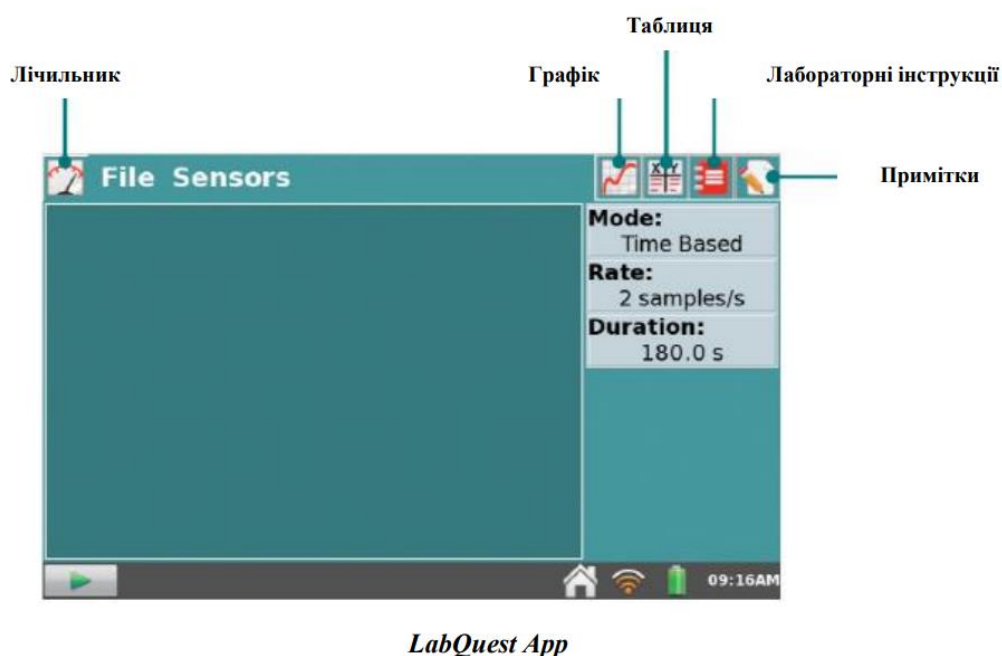
- Датчик світла – Внутрішній датчик світла знаходиться на передній частині LabQuest з лівого боку від екрану. Даний датчик світла включає один відкритий світлодіод (CH0), який реагує на видиме та інфрачервоне світло, та один відфільтрований світлодіод (CH1), який в першу чергу реагує на інфрачервоне світло. Показники CH1 вираховуються з показника CH0, а потім конвертуються у значення в люксах, яке позначає освітлення (рівень зовнішньої підсвітки), щоб імітувати реагування людського ока. Діапазон спектральної чутливості для цього датчика становить близько 400-800 нм.

## II. LABQUEST APP

Програма по збору та аналізу даних, LabQuest App, є основою LabQuest. Коли ви активуєте LabQuest, LabQuest App запускається автоматично. Якщо LabQuest App не виводиться на вашому екрані, запустіть LabQuest App у вкладці «Головна» (Home).

### Навігаційний LabQuest App

LabQuest App має п'ять різних екранів. Клікніть на бажаній закладці, щоб показати відповідний екран.



Екран «Лічильник» – встановити датчики, налаштувати параметри для збору даних та відобразити датчик для ваших підключених датчиків.

Екран «Графік» – перегляд графіку ваших даних та проведення аналізів, включаючи форми кривих.

Екран «Таблиця» – перегляд табличної презентації ваших даних, створення розрахункових стовпців та ручне введення даних.

### Меню «Файл» (File)

Файл LabQuest App може містити налаштування збору даних, графіки, таблиці даних, аналізи і навіть нотатки. Ці файли мають розширення .qtbl і

можуть зберігатися у внутрішній пам'яті LabQuest або у зовнішній пам'яті, наприклад, на USB накопичувачі або на карті microSD. Файли LabQuest App можна також відкривати та використовувати на комп'ютері з програмним забезпеченням Logger Pro.

- Новий (New) – оберіть «Новий» (New) з меню «Файл» (File), щоб переналаштувати усі параметри щодо збору даних та калібрування датчика назад до значень за замовчуванням. Якщо у вас є незбережені дані, вас попросять або зберегти, або скинути дані перед тим, як продовжити.

- Зберегти (Save) – оберіть «Зберегти» (Save) з меню «Файл» (File), щоб відобразити діалогове вікно «Зберегти як» (Save As), де ви можете клікнути на іконці джерела ( USB, SD, LabQuest) для вибору призначення, потім клікніть на назві поля «Файл» (File), щоб призначити назву для файлу.

- Видалити (Delete) – оберіть «Видалити» (Delete) з меню «Файл» (File), щоб показати перелік файлів, схожий до доступного списку, вибравши відкритий. Клікніть на іконці джерела ( USB, SD, LabQuest) для вибору джерела, де знаходиться файл, клікніть на назві бажаного файлу, потім натисніть «Видалити» (Delete). За один раз можна видалити лише один файл.

- E-mail – виберіть «E-mail» з меню «Файл» (File), щоб надіслати електронною поштою Файл даних, Графік, Текстовий файл або скріншот поточного файлу, коли LabQuest підключено до бездротової мережі Internet.

- Експортувати (Export) – виберіть «Експортувати» (Export) з меню «Файл» (File), щоб експортувати файл з поточними даними у текстовий формат для використання з іншими додатками. Клікніть на іконці джерела (USB, SD) для вибору призначення, потім клікніть «ОК» для завершення експортування. Типове використання цієї властивості – експортувати текстовий файл на SD карту або на USB накопичувач для подальших маніпуляцій з даними на комп'ютері за допомогою редактора електронних таблиць.



- Завершити (Quit) – виберіть «Завершити» (Quit) в меню «Файл» (File), щоб вийти з LabQuest App. Оскільки інші додатки можуть працювати з LabQuest App одночасно, зазвичай немає потреби виходити з LabQuest App під час стандартного використання.

## **ЗБІР ДАНИХ**

Збір даних за допомогою LabQuest починається з екрану «Лічильник» (Meter), який є екраном за замовчуванням для LabQuest App. З цього екрану ви можете переглядати показники датчика, які оновлюються в реальному часі, а також підсумок показників по збору даних. На додачу, ви можете отримати доступ до оновлених інструментів, щоб змінити та адаптувати дані налаштування для конкретного експерименту.

### Цифрові лічильники

Цифровий лічильник для кожного підключеного датчика показаний на цьому екрані. Клікніть на датчику, щоб змінити налаштування датчика. Доступні опції будуть залежати від датчика і можуть включати опції для зміни пристроїв, калібрування, видалення налаштувань та перетворення сенсору. Дані опції можна також відкрити за допомогою меню «Датчики» (Sensors).

### Аналогові лічильники

Щоб показати аналоговий лічильник, виберіть «Налаштування лічильника» (Meter Setup) з меню «Датчики» (Sensors), або як ярлик, натисніть на цифровий датчик на екрані «Лічильник» (Meter). В діалоговому вікні «Налаштування лічильника» (Meter Setup) внесіть мінімальні та максимальні значення для діапазону датчика.

### Короткий звіт по збору даних

Короткий звіт про налаштування збору даних (Режим, Швидкість, Тривалість) показано на панелі справа на екрані «Лічильник» (Meter). Для більшості датчиків режим збору даних за замовчуванням – «Часова вісь» (Time Based). Швидкість збору даних за замовчуванням для підключеного сенсору

встановлюється автоматично, коли LabQuest визначить сенсор. Щоб змінити налаштування по збору даних, клікніть на іконці звіту.

Елементи управління збором даних Щоб розпочати збір даних з екрану LabQuest App, натисніть «Зібрати» (Collect) (Play). Під час збору даних клікніть «Стоп» (Stop) , щоб попередньо зупинити збір даних.

#### Налаштування по збору даних

- Налаштування датчика (Sensor Setup) – виберіть «Налаштування датчика» (Sensor Setup) з меню «Датчики» (Sensors), щоб побачити підключені датчики. Для ручного налаштування датчиків неавтоматичної ідентифікації, клікніть на полі, що показує «Жодних датчиків» (No Sensors) для каналу, через який підключено ваш датчик. Потім виберіть відповідний датчик з переліку та клікніть «ОК».

- Збір даних (Data Collection) – виберіть «Збір даних» (Data Collection) з меню «Датчики» (Sensors) для налаштування режиму збору даних та відповідних параметрів. Перелічені параметри будуть залежати від вибраного режиму.

- Режим: Часова вісь – збір даних на основі часової осі є режимом збору даних за замовчуванням для більшості датчиків. У цьому режимі показники датчика записують з однаковими інтервалами часу. Регульовані параметри для цього режиму включають швидкість (або інтервал) і тривалість збору даних. Загальна кількість зразків для збору, залежних від цих параметрів, буде виведена на дисплей.

- Режим: Повний спектр – У разі виявлення спектрометру, LabQuest уводить режим Повного спектру (Full Spectrum). У цьому режимі, Інтенсивність, Поглинання, Флуоресценція (лише SpectroVis Plus) або % пропускання можна вимірювати як функцію довжини хвилі/

#### Налаштування графіка

LabQuest App показує екран «Графік» (Graph), коли починається збір даних. З цього екрану ви можете відрегулювати налаштування графіка. Ви

можете вибрати предмет побудови, масштабування графіку та форматування даних.

- Графічні опції – щоб проконтролювати відображення даних на графіку, виберіть «Графічні опції» (Graph Options) з меню «Графік» (Graph). Тут ви можете вибрати колонки, які використовуються для X та Y осей, а також обмеження осей. Виберіть Автомасштабування (Autoscale), щоб налаштувати діапазон даних після завершення збору даних. Ручне масштабування буде враховувати значення, які уводяться в ліміти діапазону. Щоб ввести ліміти діапазону клікніть на кожному полі та використовуйте клавіатуру, щоб увести числові значення.

На цьому екрані ви можете також вибрати дані для побудови графіку. Для осі X виберіть необхідну колонку з випадаючого меню «Колонка осі X» (X-Axis Column). Для осі Y виберіть одну або кілька колонок з запуску(ів), перелічених під розширеним полем «Графік 1 Осі Y» (Graph 1 Y-Axis). LabQuest може відображати один графік або два графіки, що мають спільну вісь X та діапазон.

### Швидкий старт для збору даних

Дотримуйтесь наступних етапів для швидкого налаштування збору основних даних.

1. Натисніть та відпустіть кнопку вмикання, що знаходиться на верхній грані LabQuest для вмикання пристрою. LabQuest App запускається автоматично. Підготовка до експлуатації LabQuest 2.

2. Підключіть аналоговий датчик до порту CH1 на LabQuest або підключіть цифровий датчик до порту DIG 1. LabQuest App автоматично визначить підключений датчик і автоматично встановить швидкість збирання для датчика за замовчуванням.

*Примітка:* Якщо ваш датчик є застарілим датчиком (DIN), якому потрібен адаптер, датчик не буде здійснювати автоматичну ідентифікацію. Натомість, вам знадобиться встановити датчик вручну. Для цього оберіть

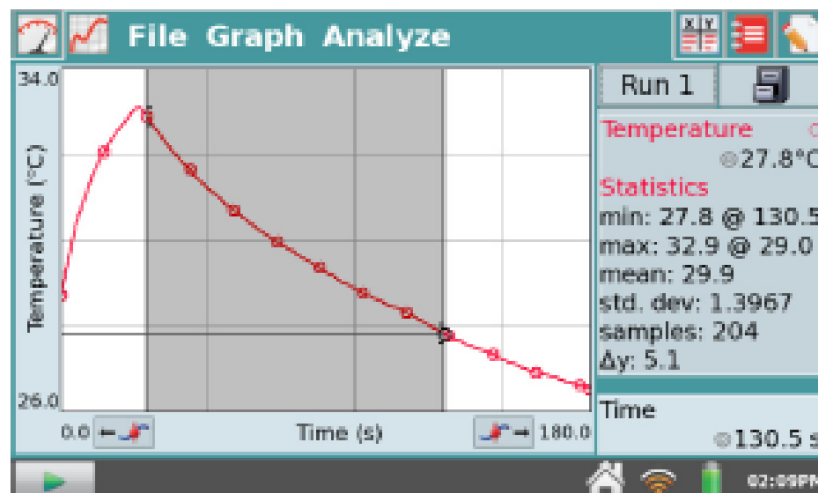
Налаштування Датчика з меню «Датчики» (Sensors). Оберіть поле «Жодних датчиків» (No Sensor) і оберіть ваш датчик зі списку.

3. Далі, натисніть «Збирати» (Collect). Розпочнеться збір даних, а LabQuest відобразить дані у реальному часі. Ви можете раніше зупинити збір даних, натиснувши «Стоп» (Stop) . Після завершення збору даних, графік автоматично перерахує дані.

4. Клікніть на графіку, щоб перевірити точку огляду. Координати точки показано на панелі з правої частини графіку. Клікніть на іншу точку або Клікніть кнопку «Перевірити» (Examine), щоб рухати курсором вліво і вправо

5. Щоб обрати діапазон даних для аналізу клікніть та протягніть курсор через графік, щоб виділити необхідний діапазон.

*Примітка:* Для аналізу усіх даних вам не потрібно обирати діапазон.



### Статистика

Для перегляду статистики обраних даних на екрані «Графік» (Graph), оберіть функцію «Статистика» (Statistics) з меню «Аналізувати» (Analyze). Оберіть комірку, щоб вибрати колонку даних. Статистична інформація виводиться на панелі справа на графіку. Щоб відобразити показану статистику, клікніть «Аналізувати» (Analyze) на екрані «Графік» (Graph), оберіть «Статистика» (Statistics), потім оберіть перевірену комірку, щоб очистити вибірку.

### Регулювання кривої

Для підбору кривої для обраних даних на екрані «Графік» (Graph), оберіть функцію «Регулювання кривої» (Curve Fit) з меню «Аналізувати» (Analyze). Оберіть комірку, щоб вибрати колонку даних. Клікніть «Вибрати форму» (Choose Fit) та оберіть бажане емпіричне рівняння. LabQuest автоматично визначає та показує коефіцієнти відповідності, а також показує попередній вигляд підходящої кривої на графіку. Клікніть «ОК», щоб застосувати форму та поверніться на екран «Графік» (Graph). Для видалення форми оберіть «Регулювання кривої» (Curve Fit) з меню «Аналізувати» (Analyze), потім оберіть перевірену комірку, щоб очистити вибірку.

## **ЦИФРОВИЙ КОМПЛЕКТ ОПТИЧНИХ ПРИЛАДІВ**

Цифровий комплект оптичних приладів дозволяє експериментально вивчати оптичні закони та явища: Призначений для виконання лабораторних робіт з оптики та атомної фізики, проведення власних навчальних експериментів. Цифровий комплект оптичних приладів сумісний з реєстратором даних LabQuest2 та аналого-цифровим перетворювачем-транслятором для збору даних Vernier LQ-Stream.

Для вивчення хвильових властивостей світла лабораторія Vernier пропонує дифракційний апарат ДАК з набором дифракційних елементів та комплект Поляризатор/Аналізатор РАК-ОЕК.

### **Дифракційний апарат ДАК**

Дифракційний апарат дозволяє створювати, переглядати та вимірювати картини дифракції та інтерференції. Збір даних здійснюється шляхом вибору розрізу форми, напрямку лазера крізь отвір і налаштування вхідної діафрагми для датчика освітленості. Датчик освітленості та датчик положення підключаються до лабораторного інтерфейсу.

## Технічні характеристики

Довжина хвилі червоного лазера: 635 нм +/- 5 нм (лазерний продукт класу 2)

Повний діапазон шкали датчика: 1, 10 і 100 мкВт

Лінійне положенні Діапазон сенсорів: 150 мм

Роздільна здатність: 40 мкм

Доступні щілини дифракції: Поодинокі прорізи (4): 0,02 / 0,04 / 0,08 / 0,16 мм

Змінні розрізи (ширина): Клин: 0,02 – 0,2 мм / Подвійна щілина: 0,04 мм (відстань 0,125 – 0,75 мм)

Подвійні прорізи (4 пари – ширина): 0,04 мм (0,25 та 0,5 мм між ними) / 0,08 мм (0,25 та 0,5 мм між ними)

Змінна подвійна щілина: така ж, як група змінних розрізів вище

Декілька розрізів 0,04 мм в ширину і 0,25 мм між ними: 4 комплекти- 2, 3, 4, 5 щілин

Порівняння системи щілин: 4 пари одиночних / подвійних щілин: 0,04 мм одинарний + 0,04 / 0,25 мм подвійний, подвоюються 0,04 / 0,25 + 0,04 / 0,50, подвоюються 0,04 / 0,25 + 0,08 / 0,25, подвійний 0,04 / 0,25 + потрійний, 0,04 / 0,25

Комплектація набору: Дифракційна щілинна система; Червоний дифракційний лазер; Комбіноване лінійне положення і датчик високої чутливості; Джерело живлення (стандартне на 5V).

Дифракційний апарат включає в себе динамічну доріжку Vernier Dynamics з датчиком координати Linear Position, червоний і зелений лазери, набір дифракційних елементів для дослідження, датчик світла високої чутливості High Sensitivity Light Sensor з регульованою роздільною здатністю, що дає можливість визначати інтенсивність світла при різних кутах дифракції.

Датчики оснащені аналоговим та цифровим виходами і підключаються до інтерфейсу LabQuest2, при цьому дані можуть бути записані як в програмі LoggerPro1, так і безпосередньо в самому інтерфейсі LabQuest2.

Загальний вигляд установки з дифракційним апаратом показаний на рис. I.:

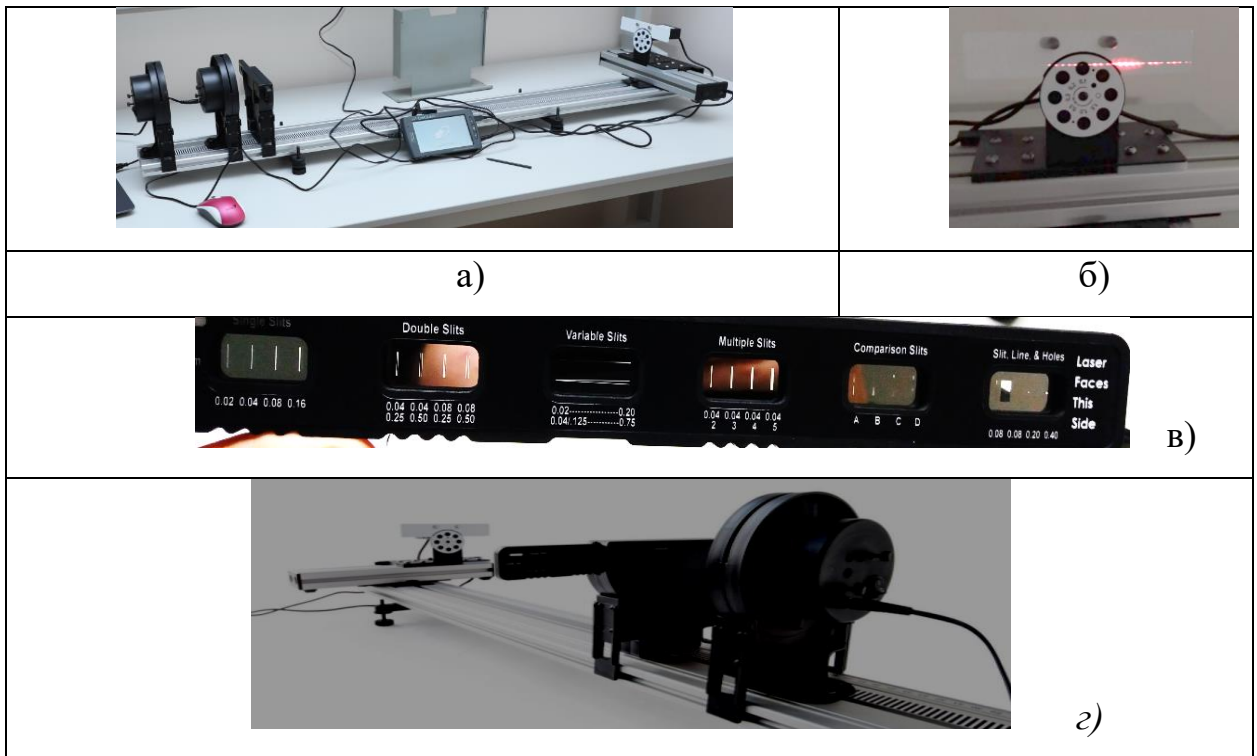


Рис. 1. Дифракційний апарат DAK: а) загальний вигляд установки, б) датчик світла високої чутливості High Sensitivity Light Sensor з регульованою роздільною здатністю, в) набір дифракційних елементів, г) Зелений дифракційний лазер Vernier GDL-DAK довжина хвилі 532 нм або червоний лазер 635 нм.

Дифракційний апарат DAK дає можливість визначити залежність інтенсивності світла при дифракції на різних перешкодах.

Розташувавши елементи оптичної схеми на динамічній доріжці, необхідно обрати роздільну здатність сенсора, обертаючи диск входного отвору датчика High Sensitivity Light Sensor (мінімальне значення входної щільності 0.1 мм). Середнє значення чутливості датчика світла – 10 мкВт.

Сенсор світла може рухатись по поперечній лаві, довжиною 20 см, при цьому датчик Combination Linear Position фіксує положення сенсора.

Напрямок лазерного променя регулюється у вертикальній і горизонтальній площині.

Для збору даних датчики підключаються до інтерфейсу LabQuest2. Основою LabQuest2 є програма по збору та аналізу даних LabQuest App. При

активації LabQuest2, вона запускається автоматично. Програма обробляє дані від датчиків світла, руху, електричні, магнітні, дозиметричні дані. Для вимірювань на ДАК тут є можливість обрати частоту і кількість вимірювань інтенсивності світла та час переміщення сенсора світла. Дані експерименту відображаються на інтерфейсі у вигляді графіків та таблиць.

Експериментальні дані можна отримати також на комп'ютері. Для збору даних на комп'ютері за допомогою LabQuest2 потрібно підключити датчик до LabQuest2, відкрити програму по збору даних на своєму комп'ютері, натиснути «Зібрати» (Collect).

### **Набір поляризаторів/аналізаторів**

Комплектація набору поляризаторів/аналізаторів:

- Фіксований поляризатор, який лінійно поляризує світло від джерела.
- Регульований аналізатор, який можна помістити після поляризатора, щоб вивчати поведінку трьох поляризаторів.



## Експеримент 1.

### ІНТЕРФЕРЕНЦІЯ СВІТЛА. ДОСЛІД ЮНГА.

Мета: спостерігати інтерференцію світла за схемою Юнга, оцінити радіус когерентності світлового пучка, визначити ширину однієї щілини та відстань між щілинами.

Обладнання: дифракційний апарат ДАК, лазер зелений Vernier GDL-ДАК довжина хвилі 532 нм або червоний лазер 635 нм, динамічна доріжка, набір дифракційних елементів, екран, реєстратор даних LabQuest2.

### Теоретичні відомості

Когерентність хвиль є необхідною умовою одержання стійкої інтерференційної картини при накладанні хвиль. Когерентність – це узгодженість у часі і просторі декількох хвильових процесів. Когерентними називають хвилі, у яких різниця фаз не змінюється з часом у кожній точці простору.

При накладанні двох монохроматичних світлових хвиль  $E_1$  і  $E_2$  з однаковою частотою  $\omega$ , амплітудою  $E_0$  і площиною поляризації, результуючу амплітуду можна знайти алгебраїчним додаванням напруженостей електричного поля хвиль:

$$E_1 = E_0 \cos(\omega t - kr_1)$$

$$E_2 = E_0 \cos(\omega t - kr_2),$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – відстані від джерел хвиль до точки накладання,  $k = 2\pi / \lambda$  – хвильовий вектор. Результуюча хвиля матиме напруженість поля:

$$E = E_1 + E_2.$$

Після тригонометричних перетворень і враховуючи, що інтенсивність  $I \sim E^2$ , можна отримати результуючу інтенсивність

$$I = 2I_0 \cdot (1 + \cos \delta), \quad (1.1)$$

де  $\delta = (kr_2 - kr_1)$  різниця фаз хвиль у точці накладання.

Якщо світлові хвилі когерентні, то різниця фаз  $\delta$  не змінюється з часом. При  $\delta=2m\pi$  з формули (1) матимемо  $I=4I_0$  – утворюється інтерференційний максимум, а при  $\delta=(2m+1)\pi$  маємо  $I=0$  – інтерференційний мінімум, тут  $m=0,1,2,\dots$ . Тобто у просторі, де накладаються когерентні хвилі утворюється інтерференційна картина – чергування максимумів і мінімумів.

Суперпозиція когерентних хвиль різної інтенсивності приводить до появи інтерференційної картини, де результуюча інтенсивність виражається більш загальною формулою (1.2):

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos \delta . \quad (1.2)$$

Когерентність світлових хвиль обмежена у часі і просторі. Це пов'язано з тим, що у природі не існують абсолютно монохроматичні хвилі та точкові джерела світла. Атоми випромінюють цуги хвиль, що описуються групою хвиль з частотами у інтервалі  $(\omega, \omega+\Delta\omega)$ , а будь-яке реальне джерело світла має розміри. Для кількісної оцінки когерентності хвиль вводиться два поняття: часова і просторова когерентність хвиль.

Часова когерентність пов'язана з немонохроматичністю джерел світла. Якщо проміжок  $\Delta\omega$  малий, то різниця фаз  $\delta$  слабо залежить від часу:

$$\delta = \Delta\omega \cdot t + (kr_2 - kr_1)$$

$\tau_{\text{ког}}$  – час, протягом якого різниця фаз змінюється на  $\pi$ , тоді  $\cos \delta$  змінюється від  $+1$  до  $-1$ , а його середнє значення у формулі (1.2) буде рівне нулю і інтерференційний член зникає. Знайдемо  $\tau_{\text{ког}}$ :

$$\Delta\delta = \pi = \Delta\omega \cdot \tau_{\text{ког}},$$

$$\tau_{\text{ког}} = \pi / \Delta\omega$$

$\tau_{\text{ког}}$  – час, протягом якого хвилі залишаються когерентними, він обмежений часом випромінювання світла атомом  $\tau_{\text{випр}}$ :

$$\tau_{\text{ког}} \leq \tau_{\text{випр}}$$

Час когерентності одиночних атомів  $\sim 10^{-8}c$ , у нагрітого твердого тіла  $\sim 10^{-15}c$ , у лазера  $\sim 10^{-5}c$ .

Довжина когерентності  $L_{\text{ког}}$  – це максимальна різниця ходу хвиль  $(r_2 - r_1)_{\text{max}}$ , при якій хвилі залишаються когерентними:

$$L_{\text{ког}} = (r_2 - r_1)_{\text{max}} = c \cdot \tau_{\text{ког}}$$

Просторова когерентність оцінює когерентність у перерізі світлового пучка і обмежена розмірами джерела світла, характеризується радіусом когерентності  $\rho_{\text{ког}}$ .

Кожна точка реального джерела створює свою інтерференційну картину, які накладаються. Нехай маємо джерело світла  $O_1O_2O_3$ , довжина якого  $b$ , світло від нього падає на щілини  $S_1S_2$ , які є когерентними джерелами. Тоді від точок  $O_1, O_2, O_3$  утворяться на екрані відповідно 3 картини зі зміщеними центрами (рис.1.1).

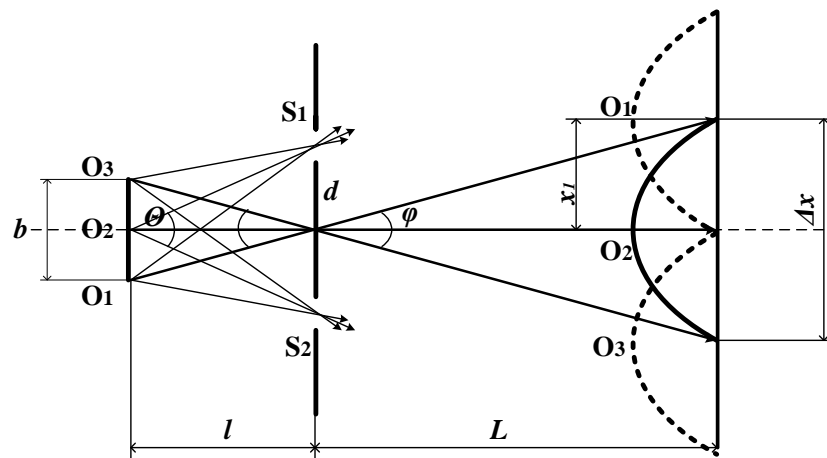


Рис. 1.1. До виводу умов просторової когерентності.

Інтерференційна картина від протяжного джерела  $O_1O_2O_3$  буде спостережуваною на екрані, коли максимуми, утворені крайніми точками джерела  $O_1$  і  $O_3$  будуть знаходитись якнайближче до максимумів від центральної точки  $O_2$ , тобто відстань між максимумами  $x_1$  буде менша півширини максимуму  $\Delta x$ :

$$x_1 < \frac{\Delta x}{2}. \quad (1.3)$$

Відомо, що ширина інтерференційної смуги рівна

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d}, \quad (1.4)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі,  $d = S_1 S_2$ , інші позначення видні на рис.1.1.

З геометричних міркувань слідує, що  $x_1 = L \cdot \frac{\varphi}{2}$ , тоді з (1.3) маємо умову

для кутового розміру  $\varphi$  джерела світла:

$$\varphi < \frac{\lambda}{d} \quad (1.5)$$

Максимально допустимі лінійні розміри  $b$  джерела можна визначити через відстань до подвійної щілини  $l$ :

$$\varphi = \frac{b}{l}; \quad \frac{b}{l} < \frac{\lambda}{d}; \quad \Rightarrow \quad b < \lambda \cdot \frac{l}{d} \quad (1.6)$$

Звідси слідує, що радіус когерентності  $\rho_{\text{ког}}$

$$\rho_{\text{ког}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \quad (1.7)$$

Скориставшись поняттям апертури інтерференції – кута максимального розкриття променів з боку джерела  $\Theta$ , радіус когерентності світлового пучка обмежений величиною:

$$\rho_{\text{ког}} < \frac{\lambda}{\Theta} \quad (1.8)$$

Довжина когерентності випромінювання природного джерела має величину не більше  $10^{-6}$  м. З цієї причини спостерігати інтерференцію в променях звичайних джерел світла (свічка, лампа, Сонце і т. ін.) дуже важко, бо при різниці ходу більше  $10^{-6}$  м, (порядку довжини хвилі) когерентність зникає і інтерференція не спостерігається.

Практичні способи одержання когерентних світлових хвиль такі, що їх початкові фази виявляються рівними. Умова когерентності забезпечується

лише для хвиль однакової частоти  $\omega$ . Для спостереження чіткої інтерференційної картини необхідно також, щоб хвилі були поляризовані в одній площині і мали приблизно рівні амплітуди.

Перше спостереження інтерференції з сонячним світлом провів в 1807 році англійський вчений Томас Юнг. Схема установки цього досліду наведена на рис.1.2. Сонячне світло попадало в темне приміщення через вузьку щілину  $S$  від якої світлова хвиля падала на дві рівновіддалені від осі паралельні щілини  $S_1 S_2$ .

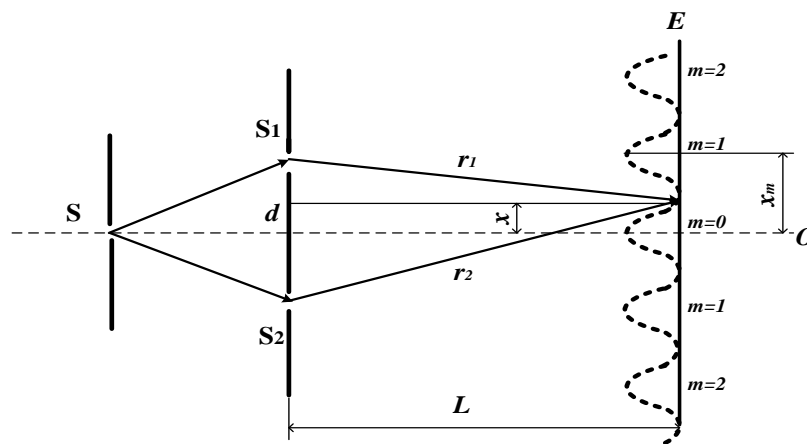


Рис. 1.2. До розрахунку ширини інтерференційної смуги.

Таким чином, щілини  $S_1, S_2$  виконували роль когерентних джерел. Інтерференція спостерігалась на екрані  $E$ , який розміщений на віддалі  $L$  паралельно до  $S_1 S_2$ .

При відстані між щілинами  $d$  різниця ходу хвиль  $\Delta r = r_2 - r_1$  для деякої точки екрана, віддаленої від оптичної осі на відстані  $x$ , може бути знайдена так:

$$r_2^2 = L^2 + (x + d/2)^2$$

$$r_1^2 = L^2 + (x - d/2)^2$$

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1) \approx \Delta r \cdot 2L = 2dx, \quad \text{звідки} \quad \Delta r = d \cdot x / L.$$

Якщо спостерігається максимум інтерференції, то  $\Delta r = m\lambda$ , якщо мінімум –  $\Delta r = (2m + 1)\lambda / 2$ .

Тоді для координат максимумів і мінімумів на екрані маємо відповідно:

$$x_m = \frac{m\lambda L}{d} \quad \text{і} \quad x_m = (2m+1)\frac{\lambda L}{2d} \quad (1.9)$$

де  $m=0,1,2, \dots$  – порядок максимуму, а  $(m+1)$  – порядок мінімуму.

Відстань між двома темними смугами (мінімумами) називають шириною інтерференційної смуги і дорівнює:

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot L}{d} \quad (1.10)$$

Величина  $\Delta x$  не залежить від порядку інтерференції і співпадає з відстанню між світлими смугами. Загалом інтерференційна картина у досліді Юнга складається з паралельних темних і світлих смуг однакової ширини, що чергуються.

З природним світлом можна отримати лише кілька смуг слабкої інтенсивності, дослідити які дуже важко. Це пояснюється його низькою просторовою і часовою когерентністю. Якщо джерелом світла є лазер, то можна легко отримати інтерференційну картину із декількох десятків яскравих смуг, що і досягається в цій роботі.

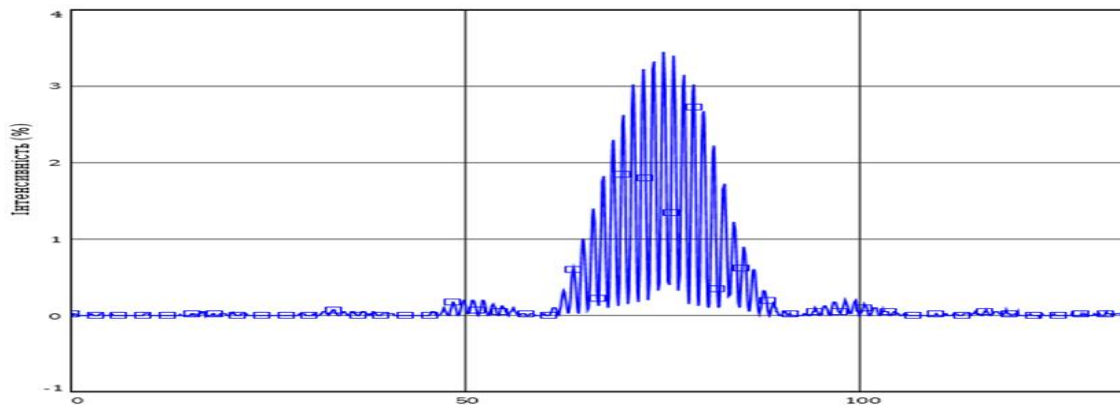
### Попередні запитання

- Що таке інтерференція світла? За яких умов вона спостерігається?
- Які хвилі називають когерентними?
- Дайте визначення просторової і часової когерентності.
- Які фізичні фактори обмежують спостереження інтерференції?
- Які є способи спостереження двопроменевої та багатопроменевої інтерференції?
- Запишіть умови спостереження інтерференційних максимумів та мінімумів.
- Запишіть формулу ширини інтерференційної смуги у досліді Юнга.

## Порядок роботи

У даній роботі використовується дифракційний апарат ДАК з червоним лазером з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 635 \pm 5$  нм, що забезпечує часову і просторову когерентність і відкидає необхідність використання щілини  $S$ .

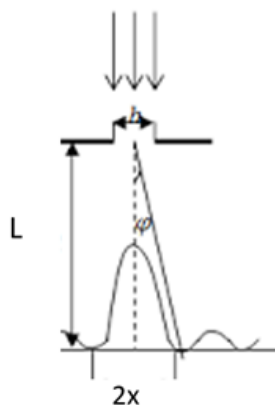
1. На динамічній доріжці зліва закріпити лазер, набір дифракційних елементів Vernier та на іншому кінці доріжки – поперечну лаву довжиною 20 см з датчиком координати Linear Position та датчиком світла високої чутливості High Sensitivity Light Sensor з регульованою роздільною здатністю.
2. Пересуваючи рамку, обрати дифракційний елемент Double Slits 2.
3. Встановити відстань між дифракційним елементом та датчиком світла не менше 1000 мм.
4. Розташували елементи оптичної схеми на динамічній доріжці, обрати роздільну здатність сенсора, обертаючи диск вхідного отвору датчика High Sensitivity Light Sensor (мінімальне значення вхідної щілини 0,1 мм).
5. Підключити датчики, які оснащені аналоговим та цифровим виходами, до інтерфейсу LabQuest2.
6. Ввімкнути лазер і відрегулювати гвинтами його положення по горизонталі і вертикалі так, щоб інтерференційна картина мала максимальну яскравість та попадала у вхідний отвір датчика світла.
7. Встановити рухомий блок датчиків на поперечній лаві у крайнє положення та обнулити координату на екрані LabQuest2.
8. Налаштувати параметри датчика положення на LabQuest2, встановивши час вимірювання до 20 секунд.
9. Почати збір даних, повільно і плавно переміщуючи рухомий блок по поперечній лаві.
10. Графік розподілу інтенсивності світла  $I$ , % від координати  $l$  матиме вигляд:



Обвідна на графіку показує картину дифракції світла на кожній з щілин, що дозволяє визначити ширину щілини.

### Завдання 1. Знайти ширину однієї щілини

Для того щоб знайти ширину щілини використовуємо умову дифракційних мінімумів на одній щілині:



$$b \cdot \sin \varphi = m \cdot \lambda,$$

З рисунку видно, що  $\frac{x}{L} = \operatorname{tg} \varphi$ . Якщо кути дифракції малі,  $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \frac{x}{L}$ . Отже,

$$b = \frac{m \cdot \lambda \cdot L}{x} \quad (1.11)$$

де  $b$  – ширина щілини,  $m$  – порядок мінімуму дифракційної картини,  $x$  – відстань від центру до  $m$ -того мінімуму (різниця положень),  $L$  – відстань від щілини до екрана,  $\lambda$  – довжина хвилі лазера ДАК.

11. Скориставшись таблицею даних на LabQuest2, визначити положення  $l$  центрального максимуму та декількох (2-3) мінімумів ( $I = 0\%$ ) ліворуч і праворуч від нього.

12. Визначити відстань  $x$  між мінімумом і центральним максимумом та занесіть дані у таблицю:

$$x = |l_{max} - l_i|$$



m	Положення $l$ , мм	$I$ , %	$x$ , мм	$b$ , мм	$b_{\text{сер}}, \text{мм}$
2	$l_2$	0,00			
1	$l_1$	0,00			
0	$l_{\text{max}}$	$I$ , %			
-1	$l_{-1}$	0,00			
-2	$l_{-2}$	0,00			

13. Виміряти відстань  $L$  від щілини до екрана (сенсора).
14. Обчислити ширину щілини та похибку вимірювання, представити результат у вигляді:

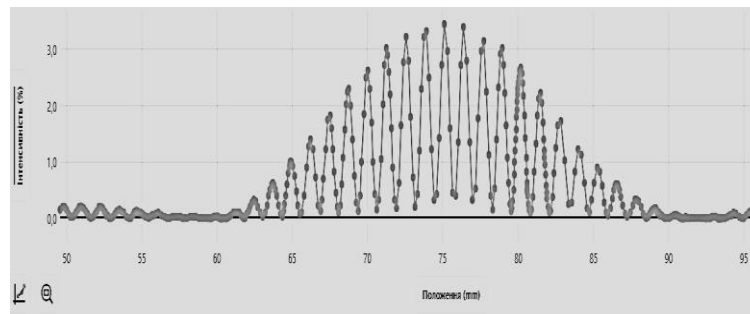
$$b = b_{\text{сер}} \pm \Delta b$$

15. Порівняти результат з даними дифракційного елемента.

Завдання 2. Обчислити відстані  $d$  між щілинами у досліді Юнга.

Для визначення відстані між щілинами у досліді Юнга визначимо ширину інтерференційної смуги та формулу ширини смуги (1.10).

16. Збільшити на LabQuest2 центральну частину графіка з попереднього завдання (п.10) і отримати детальний вид інтерференційної картини:



17. З табличних даних або за графіком виміряти та загальну ширину  $D$  декількох ( $k$ ) світлих смуг. Величина  $D/k = \Delta x$  – дорівнює середньому значенню ширини інтерференційної смуги.

18. Обчислити відстань між щілинами з формули (1.10):

$$d = \lambda L / \Delta x$$

19. Знайти похибку вимірювань та записати результат у вигляді

$$d = \bar{d} \pm \Delta d .$$

20. Результат порівняти з характеристиками дифракційних елементів Double Slits Vernier.

## Експеримент 2.

### ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ БІПРИЗМИ ФРЕНЕЛЯ

Мета: спостерігати інтерференцію світла від біпризми, визначити довжину світлової хвилі лазера.

Обладнання: дифракційний апарат ДАК, динамічна доріжка Vernier Dynamics з датчиком координати Linear Position, червоний або зелений лазери, біпризма Френеля, короткофокусна лінза 34 мм, набір дифракційних елементів, екран, реєстратор даних LabQuest2.

#### Теоретичні відомості

Накладання світлових хвиль, в результаті якого в одних точках виникають коливання напруженості електромагнітного поля з максимальною амплітудою, а в інших – з мінімальною, називається інтерференцією світла, тобто відбувається перерозподіл інтенсивності світла у області накладання хвиль – утворюються система максимумів і мінімумів, яку називають інтерференційною картиною.

Для одержання стійкої інтерференційної картини необхідно, щоб світлові хвилі, що накладаються, були когерентними, тобто мали сталу у часі різницю фаз у кожній точці простору, де ця картина спостерігається. Якщо хвилі плоскополяризовані, то додатковою умовою є те, їх площини поляризації не повинні бути перпендикулярні, найвиразніша контрастна інтерференційна картина утворюється, коли площини поляризації паралельні, а амплітуди хвиль, що накладаються, однакові.

Існують різні способи спостереження двопроменевої інтерференції, одним з найпростіших для експерименту є метод із застосуванням біпризми Френеля (рис. 2.1.).

Біпризма являє собою оптичну систему з двох трикутних призм (') і (") із малими кутами заломлення  $\alpha < 30'$ , які з'єднані своїми основами (рис. 1). У досліді з біпризмою Френеля джерелом світла є щілина  $S$ , яка забезпечує

просторову когерентність світла (у перерізі пучка) і паралельна до ребра біпризми.

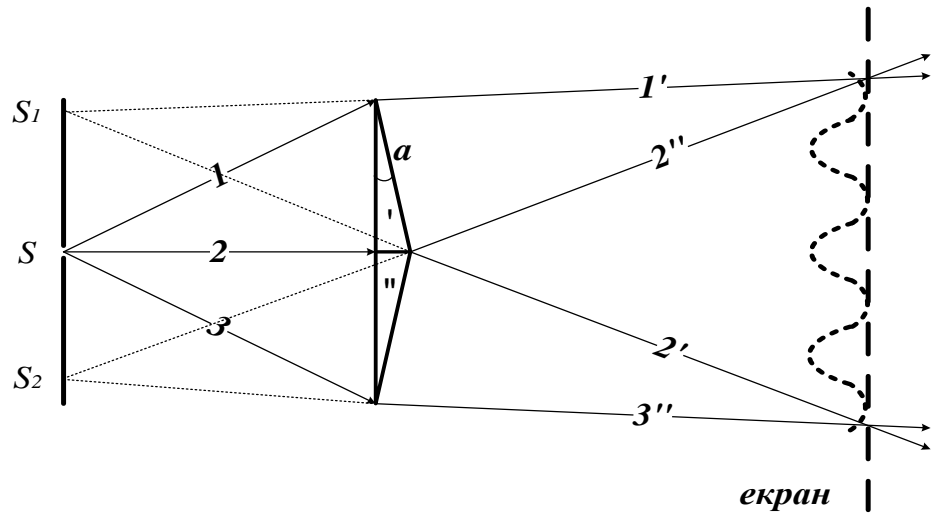


Рис. 2.1. Хід променів у біпризмі.

Промені від щілини  $S$ , падають на біпризму Френеля і внаслідок заломлення розділяються на два пучки, обмежені променями  $1'-2''$  та  $2''-3''$ , що перетинаються за призмою і утворюють область інтерференції між променями  $2'-2''$ . Продовження заломлених кожною призмою променів перетинаються в точках  $S_1$  і  $S_2$ , які є уявними зображеннями щілини  $S$  і можуть розглядатись як уявні когерентні джерела світла. Умову когерентності забезпечує використання щілини  $S$  у якості джерела світла. В області накладання заломлених світлових хвиль можна спостерігати інтерференційну картину в вигляді паралельних темних і світлих смуг на екрані. Максимум нульового порядку інтерференції знаходиться на оптичній вісі системи, яка проходить через щілину  $S$  та ребро біпризми.

Відомо, що ширина інтерференційної смуги  $\Delta x$  на екрані зв'язана з відстанню  $L$  від щілини  $S$  до екрана і відстанню між уявними джерелами

$d = S_1S_2$  співвідношенням:

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot L}{d}, \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  – довжина світлової хвилі, яку можна звідси обчислити, виміривши інші величини у експерименті.

Для цього необхідно скласти на оптичній лаві установку, зображену на рис. 2.2.

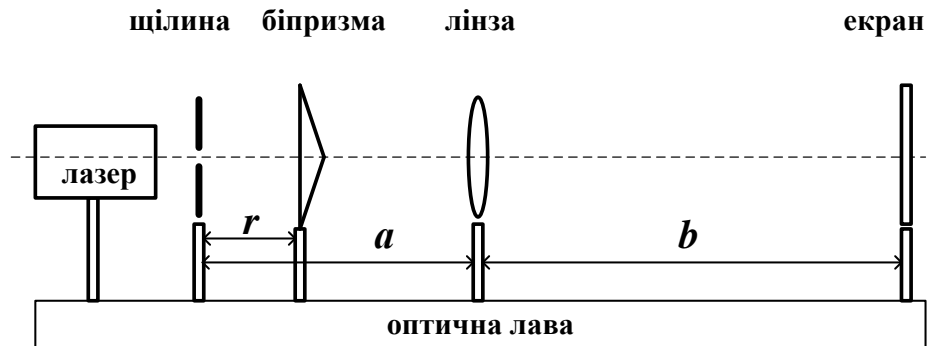


Рис. 2.2. Схема установки.

Відстань  $d$  між уявними джерелами  $S_1$  і  $S_2$  можна знайти, скориставшись кутом відхилення  $\varphi$ , що дає оптичний клин:

$$\varphi = \alpha \cdot (n - 1),$$

де  $n$  – показник заломлення призми,  $\alpha$  – заломлюючий кут призми. Тоді

$$d = 2r \cdot \alpha (n - 1) = r \cdot B, \quad (2.2)$$

де  $n = 1,85$ ;  $B = 2 \cdot \alpha (n - 1) = 7,42 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$  – стала біпризми.

Звичайно  $\Delta x$  мале і для збільшення інтерференційної картини можна використати збірну короткофокусну лінзу (з фокусною відстанню  $f$ ), яку поставити від щілини на відстані  $a \gg f$  (рис. 2.3). При цьому лінза утворює дійсне зменшене зображення щілин  $S_1$  і  $S_2$  у своїй фокальній площині на відстані  $a' \approx f$  від лінзи, відстань  $d$  між щілинами зменшується до  $d'$ , причому:

$$\frac{d'}{d} = \frac{a'}{a} \approx \frac{f}{a}; \text{ звідки } d' = \frac{d \cdot f}{a}$$

Розмір області інтерференції  $l_k$  і ширина інтерференційної смуги  $\Delta X$  збільшаться і становить:

$$\Delta X = \frac{\lambda \cdot L}{d'} = \frac{\lambda \cdot (b - f) a}{d \cdot f}. \quad (2.3)$$

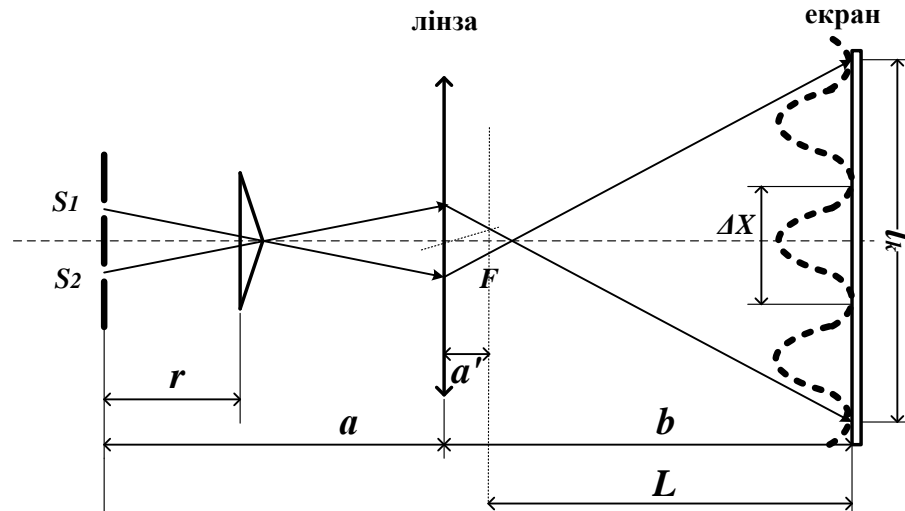


Рис. 2.3. Оптична схема установки.

Ширину інтерференційної смуги  $\Delta X$  можна визначити з досліду:

$$\Delta X = \frac{l_k}{k}, \quad (2.4)$$

де  $k$  – кількість інтерференційних смуг на екрані. Тоді з формули (1.3), враховуючи (1.2), знайдемо довжину світлової хвилі:

$$\lambda = \frac{l_k}{k} \cdot \frac{rBf}{(b-f)a}.$$

Поділивши чисельник і знаменник на  $f$ , введемо оптичну силу лінзи  $D=1/f$  і отримаємо розрахункову формулу для довжини світлової хвилі:

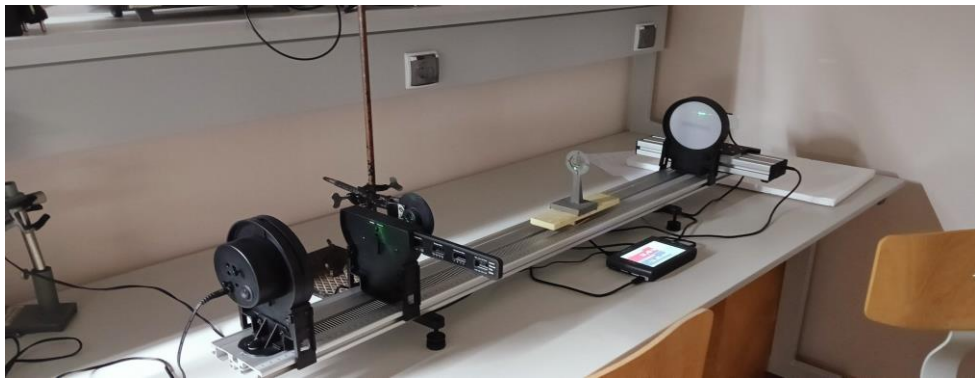
$$\lambda = \frac{l_k}{k} \cdot \frac{rB}{(Db-1)a}. \quad (2.5)$$

### Попередні запитання

- У чому полягає явище інтерференції?
- Чому не спостерігається інтерференція від двох незалежних джерел світла?
- Назвіть методи одержання когерентних світлових хвиль.
- Запишіть умови виникнення максимумів і мінімумів інтерференції.
- Які методи спостереження двопроменевої інтерференції ви знаєте?
- Накресліть хід променів у біпризмі Френеля.
- Як змінюється інтерференційна картина при зміні відстані щілина – біпризма.

## Порядок роботи

1. Встановити на динамічній доріжці зелений дифракційний лазер Vernier GDL-DAK (довжина хвилі  $532 \text{ нм}$ ) або червоний лазер ( $635 \text{ нм}$ ), набір дифракційних елементів, короткофокусну лінзу, датчик світла високої чутливості і екран згідно рис. 2.4.:

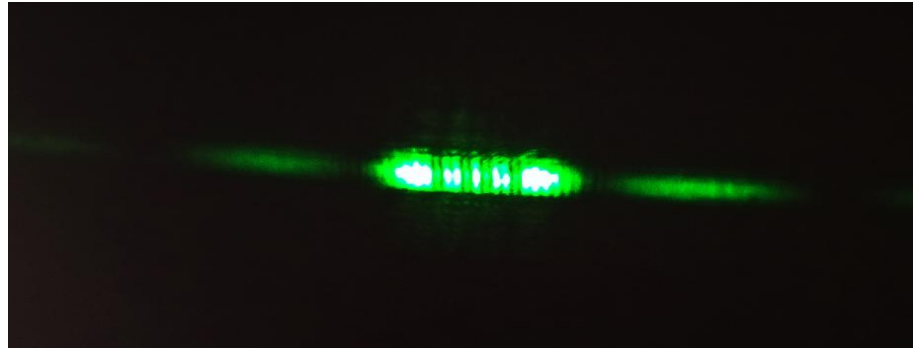


*Рис. 2.4. Загальний вигляд установки.*

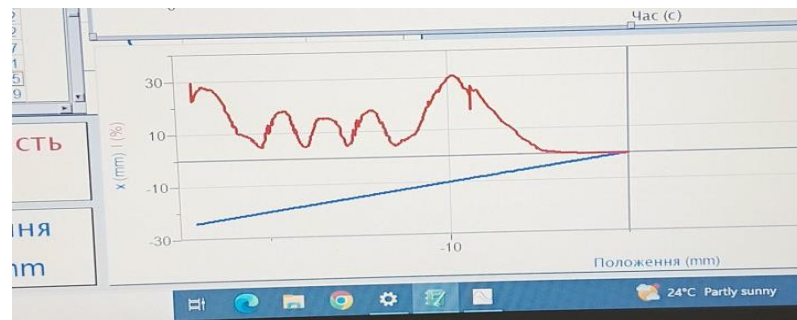
2. З набору елементів обрати одинарну щілину шириною  $0,02 \text{ мм}$  або  $0,04 \text{ мм}$ .
3. Ввімкнути лазер та відрегулювати напрямок лазерного променя так, щоб дифракційна картина на екрані мала максимальну яскравість, та попадала у вікно сенсора світла.
4. Встановити сенсор світла на максимальну чутливість поворотом диска до положення  $0,1$  вхідного отвору.
5. Отримати на екрані дифракційну картину з шириною центральної світлої смуги  $2-3 \text{ см}$ .
6. На відстані  $r \sim 10 \text{ см}$  від щілини встановити біпризму так, щоб промінь лазера попадав на її ребро. При цьому в області центрального дифракційного максимуму від щілини на екрані з'явиться яскрава смужка, яка і є інтерференційною картиною у реальному масштабі.
7. Для збільшення картини встановити за біпризмою лінзу з фокусною відстанню  $f = 3,4 \text{ см}$  на відстані  $a = 40 \div 50 \text{ см}$  від щілини. Загальна ширина інтерференційної картини має складати декілька сантиметрів. У

центрі картини повинен спостерігатися максимум. Якщо кількість смуг велика, зменшіть відстань  $r$  між біпризмою і щілиною.

8. Якщо картина несиметрична – плавно переміщуйте біпризму у поперечному напрямку. Кількість смуг залежить від відстані між щілиною і біпризмою. Інтерференційна картина на екрані матиме вигляд:



9. Плавно і повільно переміщуючи сенсор, отримати графік інтерференційної картини з максимумів і мінімумів на дисплеї LabQuest2:



10. За графіком або таблицею даних визначити координати крайніх мінімумів  $x_1$  та  $x_2$  і обчислити загальну ширину картини:

$$l_k = |x_2 - x_1|$$

11. Виміряти відстані  $r$ ,  $a$ ,  $b$  і кількість світлих смуг  $k$  між крайніми мінімумами. Повторити вимірювання не менше 3 разів при різних  $r$ .

12. За формулою (2.5) обчислити довжину хвилі для кожного досліду.

13. Обчислити похибку вимірювань та представити результат у вигляді:

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$$

14. Порівняти результат з номінальною характеристикою лазера та зробити висновок щодо точності методу.

### Експеримент 3.

## ВИВЧЕННЯ ДИФРАКЦІЇ ФРАУНГОФЕРА НА ЩІЛИНІ

Мета: отримати дифракційну картину та визначити ширину щілини.

Обладнання: дифракційний апарат ДАК, динамічна доріжка Vernier Dynamics з датчиком координати Linear Position, червоний або зелений лазери, набір дифракційних елементів, реєстратор даних LabQuest2.

### Теоретичні відомості

Дифракція Фраунгофера, на відміну від дифракції Френеля, спостерігається, коли відстані між перешкодою та джерелом світла і місцем спостереження значно більші за розміри перешкоди, тобто кажуть, що це дифракція у дальній зоні або у паралельних променях.

Якщо паралельний пучок світла (плоску хвилю) направити на щілину, то після щілини в результаті дифракції пучок перестає бути паралельним, заходячи в область геометричної тіні. Згідно принципу Гюйгенса – Френеля можна знайти фронт цієї хвилі та розподіл амплітуд дифрагрованої хвилі у просторі за щілиною, як результат інтерференції вторинних когерентних хвиль, що випромінюються у площині щілини (рис. 3.1).

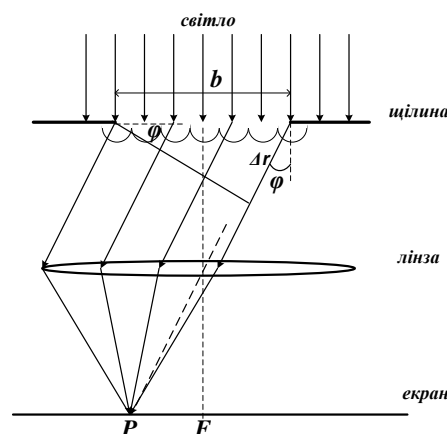


Рис. 3.1. Дифракція на щілині.  $b$  – ширина щілини,  $\varphi$  – кут дифракції,  $\Delta r$  – різниця ходу крайніх променів,  $F$  – фокус лінзи,  $P$  – точка накладання хвиль.



На екрані, що знаходиться на великій відстані від щілини або у фокальній площині лінзи  $F$  (дифракція Фраунгофера), спостерігається дифракційна картина у вигляді світлих і темних смуг, паралельних до щілини. Центральний максимум знаходить-ся у фокусі лінзи.

Розрахунок дифракційної картини на щілині дає такий розподіл амплітуд  $A_\varphi$  світлової хвилі в залежності від синуса кута дифракції  $\varphi$ :

$$A_\varphi = A_0 \frac{\sin\left(\frac{b\pi}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{b\pi}{\lambda} \sin \varphi} \quad (3.1)$$

де  $A_0$  – амплітуда хвилі у центрі дифракційної картини,  $\lambda$  - довжина хвилі випромінювання,  $b$  – ширина щілини.

Темні і світлі смуги на екрані називаються дифракційними порядками.

Амплітуда  $A_\varphi$  дорівнює нулю для кутів, які задовольняють умові

$$\frac{b\pi}{\lambda} \cdot \sin \varphi_m = \pm m\pi \quad (3.2)$$

де  $m = 1, 2, 3, \dots$  тобто для таких  $\varphi_m$ , коли  $\sin \varphi_m = \pm m\lambda/b$ .

Зазвичай умову дифракційних мінімумів записують у вигляді:

$$b \cdot \sin \varphi_m = \pm m\lambda \quad (3.3)$$

При кутах  $\varphi_m$ , які задовольняють умову (3), будемо мати на дифракційній картині темні смуги. З формули (3), знаючи кут  $\varphi_m$ , можна визначити ширину щілини  $b$ .

Інтенсивність світла пропорційна квадрату амплітуди, тому

$$I_\varphi = I_0 \left[ \frac{\sin\left(\frac{b\pi}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\frac{b\pi}{\lambda} \sin \varphi} \right]^2 \quad (3.4)$$

де  $I_0$  – інтенсивність світла, яка спостерігається у точці  $F$ .

Числові значення інтенсивності головного і наступних мінімумів максимумів відносяться як  $1 : 0,045 : 0,016 \dots$  і т.д.

Наближено ці відношення можна записати в загальному вигляді:

$$I_0 : I_m = 1 : \frac{4}{(2m+1)^2 \pi^2} \quad (m=1,2,3\dots) \quad (3.5)$$

Графік розподілу інтенсивності світла при дифракції Фраунгофера на щілині показаний на рис. 3.2.

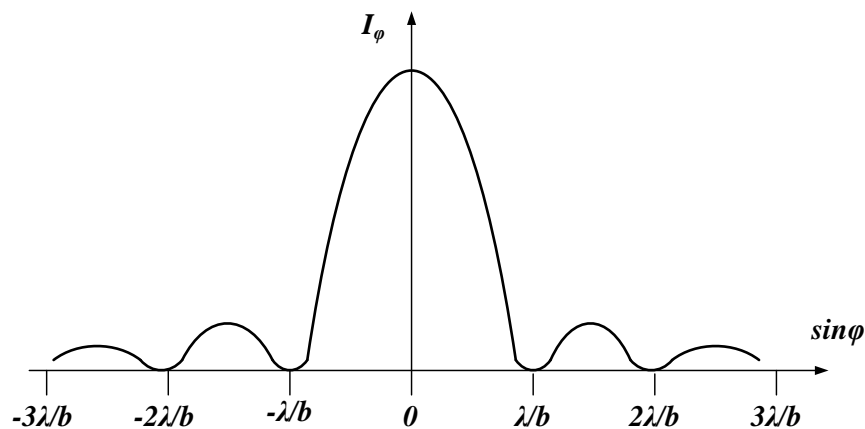


Рис. 3.2. Розподіл інтенсивності світла при дифракції Фраунгофера на щілині.

Для дослідів ідеальним джерелом практично паралельних променів монохроматичного світла є лазер. Якщо лазерне випромінювання направити нормально до площини щілини (рис. 3.1), то на віддаленому екрані отримаємо яскраву світлу смугу, з обох боків якої чергуються слабші максимуми і мінімуми.

Користуючись формулою (3.3) можна визначити ширину щілини  $b$ .

Відстань від щілини до екрана  $L \sim l_m$ , що значно більше довжини хвилі і ширини щілини і забезпечує умову спостереження дифракції Фраунгофера.

У цьому досліді слід зважити на те, що кути дифракції малих порядків ( $m=1,2,3\dots$ ) є малими. Тоді величина  $\sin\varphi_m \approx \operatorname{tg}\varphi_m = x/L$ , де  $x$  – відстань від центру до  $m$ -того мінімуму дифракційної картини (рис. 3.4).

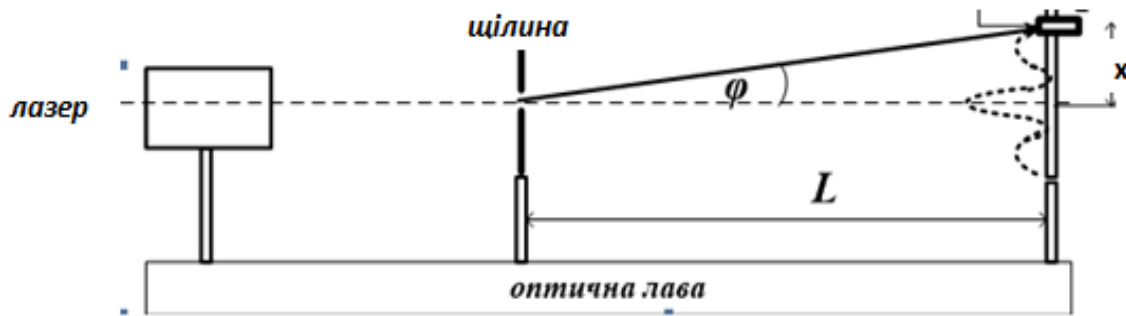


Рис. 3.3. Схема установки.

Остаточно для ширини щілини можна записати:

$$b = \frac{m \cdot \lambda \cdot L}{x} \quad (3.6)$$

### Попередні запитання

- У чому полягає явище дифракції, коли воно спостерігається?
- Сформулюйте принцип Гюйгенса – Френеля.
- В чому полягає метод зон Френеля? Коли він застосовується?
- За яким критерієм відрізняють дифракцію Френеля і Фраунгофера.
- Як розраховують дифракційну картину від щілини?
- Як змінюється дифракційна картина при зміні ширини щілини?

### Порядок роботи

1. Закріпити на доріжці та увімкнути джерело світла ( червоний лазер  $\lambda = 635 \text{ нм}$  або зелений лазер  $\lambda = 532 \text{ нм}$ ).
2. Зібрати дифракційний апарат, як показано на рис. 3.4.
3. Встановити відстань від щілини до екрана  $L \sim 1 \text{ м}$ .
4. Перемістити датчик положення ДАК у правий край.



Рис. 3.4. Дослідна установка.

5. Підключити датчики до інтерфейсу LabQuest2 та запустити програмне забезпечення для збору даних.
6. Встановити сенсор світла на максимальну чутливість поворотом диска до положення 0,1 вхідного отвору.
7. Почати збір даних.
8. Повільно і плавно перемістити сенсор світла по всій довжині поперечної доріжки. Для виконання руху знадобиться приблизно 30 секунд. Якщо рухатись занадто швидко, сенсор світла не встигне реагувати на зміни інтенсивності.
9. Переміщуючи курсор по графіку (або з таблиці даних) визначити положення головного максимуму та мінімумів 1-го, 2-го порядку з обох сторін, як показано на рис. 3.5.

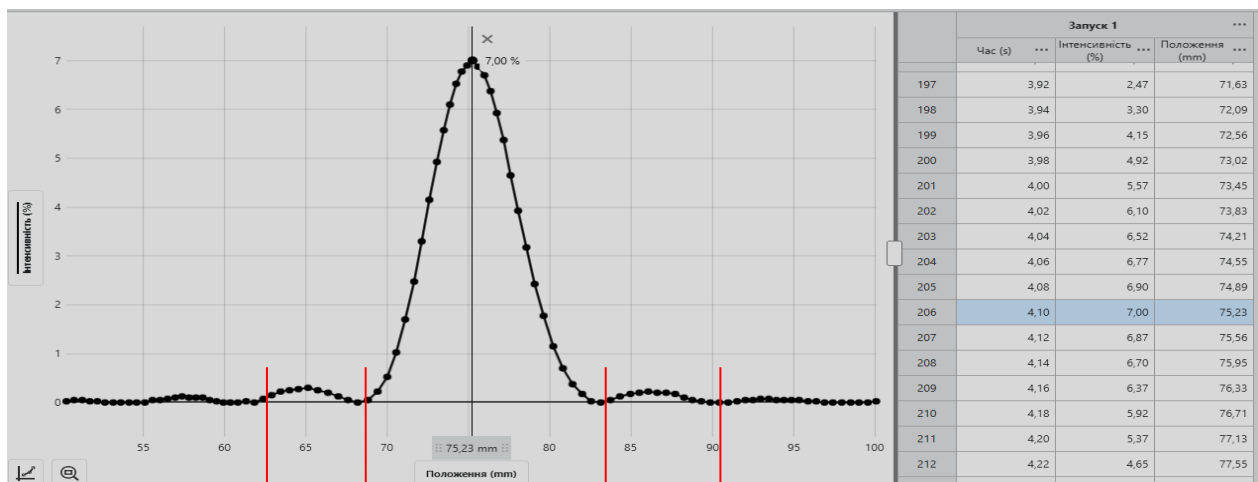


Рис. 3.5. Дифракційна картина від щілини.

10. Обчислити відстань  $x$  від центру до  $m$ -го мінімуму дифракційної картини, як  $|l_m - l_0| = x$ .

11. Обчислити ширину щілини  $b_i$  за формулою (3.6.) для кожного мінімуму.
12. Всі вимірювання та обчислення занести до Таблиці 3.1.
13. Подати результат вимірювання у вигляді  $b = b_{\text{сер}} \pm \Delta b$ .

Таблиця 3.1.

Порядок мінімумат	Положення головних мінімумів $l_m, \text{мм}$	$\lambda, \text{нм}$	$L, \text{мм}$	$x, \text{мм}$	$b_i, \text{мм}$	$b_{\text{сер}}, \text{мм}$

13. Порівняти отриманий результат з номінальною шириною щілини.  
Зробити висновок щодо точності експерименту.

## Експеримент 4.

### ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ ДИФРАКЦІЙНОЇ ГРАТКИ

Мета: вивчення дифракції світла на ґратці та визначення сталої дифракційної ґратки.

Обладнання: дифракційний апарат ДАК, динамічна доріжка Vernier Dynamics з датчиком координати Linear Position, червоний або зелений лазери, біпризма Френеля, набір дифракційних елементів, екран, реєстратор даних LabQuest2.

#### Теоретичні відомості

Дифракційна ґратка – це оптичний прилад для дослідження спектрального складу випромінювання, дія якого заснована на використанні явища дифракції світла. Дифракційна ґратка являє собою велику кількість ( $N$ ) регулярно розташованих однакових вузьких штрихів (щілин або виступів), які нанесені на деяку поверхню і утворюють періодичну структуру.

Здебільшого дифракційна ґратка може бути у вигляді плоскої скляної поверхні, на якій спеціальною машиною нанесено досить багато (інколи сотні тисяч) прямих рівновіддалених штрихів. У гарних ґраток штрихи мають довжину  $\sim 10$  см, а на кожний міліметр приходиться до 2000 штрихів. При цьому загальна ширина ґратки досягає 10–15 см.

На дифракційній ґратці відбувається, як дифракція світла на кожній щілині, так й інтерференція від різних щілин. В результаті утворюється складна дифракційна картина, що складається з головних мінімумів, головних максимумів, додаткових мінімумів, додаткових максимумів (див. рис. 4.1).

Суму ширини однієї щілини  $b$  і ширини штриха  $a$  називають сталою або *періодом ґратки*  $d$ :

$$d = a + b. \quad (4.1)$$

Характеристикою ґратки є також  $n$  – кількість штрихів на 1 мм

$$n = 1/d. \quad (4.2)$$

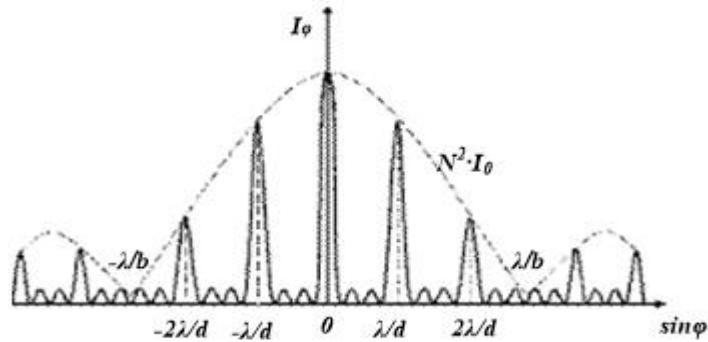


Рис. 4.1. Графік функції  $I_\varphi(\sin\varphi)$  та її вигляд для кількості щілин  $N=4$ .

Розглянемо хід променів світла на дифракційній ґратці. Нехай на неї перпендикулярно падає плоска світлова хвиля (пучок паралельних променів) з довжиною хвилі  $\lambda$  (рис. 4.2).

Коли хвиля дійде до ґратки, від кожної точки на її щілинах за принципом Гюйгенса будуть поширюватись елементарні вторинні сферичні хвилі, які поширюються у різних напрямках, що характеризуються кутом  $\varphi$  (кутом дифракції), який приймає значення  $0 \pm \pi/2$ .

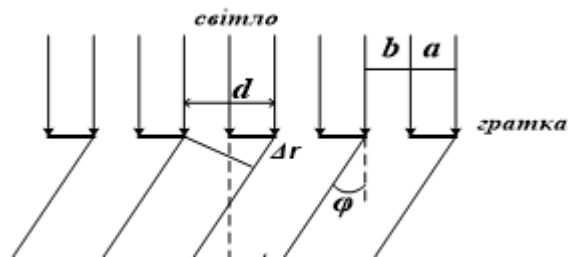


Рис. 4.2. Хід променів світла на дифракційній ґратці.

Якщо світло падає на ґратку перпендикулярно, то кут дифракції  $\varphi = 0$ , і утворюється дифракційний максимум нульового порядку, оскільки різниця ходу усіх променів тут рівна нулю, що задовольняє умову максимуму:

$$\Delta r = m\lambda, \quad \text{при } m=0 \quad (4.3)$$

Для усіх інших напрямків, що характеризуються кутом дифракції  $\varphi \neq 0$ , хвилі від сусідніх щілин мають іншу різницю ходу  $\Delta r$ . Знайдемо умову, при якій вторинні хвилі, що йдуть від різних щілин під кутом дифракції  $\varphi$ , підсилюють одна одну. Для сусідніх щілин відстань між відповідними джерелами

сферичних хвиль рівна сталій ґраткп  $d$ , а різниця ходу між ними  $\Delta r = d \cdot \sin\varphi$ . Якщо на цьому відрізку укладається ціле число довжин хвиль, то хвилі від усіх щілин, що накладаються у точці  $P$  на екрані, підсилюють одна одну, утворюючи *головні максимуми*.

Головні максимуми дифракції будуть спостерігатись при кутах  $\varphi_m$ , що задовольняють умові:

$$d \sin \varphi_m = m\lambda, \quad (4.4)$$

де  $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$  – порядок (номер) максимуму.

Положення головних мінімумів знаходять з умови мінімумів на одній щілині:

$$b \sin \varphi = \pm m\lambda, \quad (4.5)$$

де  $m = \pm 1, \pm 2 \dots$  – порядок (номер) мінімуму.

Якщо кути дифракції малі,  $\sin \varphi \approx \tan \varphi \approx \frac{x}{L}$ , тоді стала дифракційної ґратки визначається за формулою:

$$d = \frac{m_{max} \cdot \lambda \cdot L}{x} \quad (4.6)$$

А ширина щілини визначається за формулою

$$b = \frac{m_{min} \cdot \lambda \cdot L}{x} \quad (4.7)$$

### Попередні запитання

- Що таке дифракційна ґратка?
- Які процеси відбуваються при падінні світла на періодичну структуру?
- Які явища відбуваються на дифракційній ґратці?
- Запишіть умови головних максимумів і мінімумів дифракції на одновимірній ґратці.
- Як змінюється дифракційна картина на ґратці при зміні величин  $b$ ,  $d$ ,  $N$ . Побудувати розподіл інтенсивності на екрані для заданої дифракційної ґратки.
- Від чого залежать спектральні характеристики дифракційної ґратки?
- Назвіть особливості дифракційних спектрів.



## Порядок роботи

Дослідна установка (рис. 4.3) складається з розміщених на оптичній лаві напівпровідникового червоного лазера ( $\lambda = 635 \text{ нм}$ ), щілини, датчика положення.

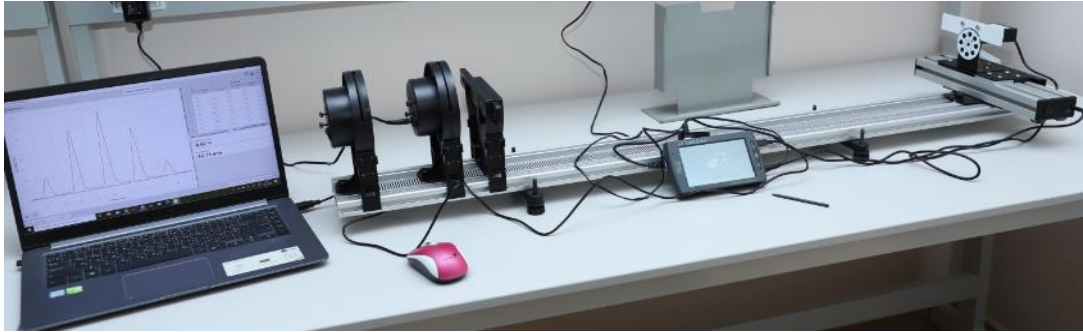


Рис. 4.3. Дослідна установка.

1. Зібрати дифракційний апарат згідно рис. 4.3, взявши відстань від ґратки до екрана до  $L=1000 \text{ мм}$ .
2. Вибрати з набору дифракційних елементів ґратку з кількістю штрихів  $N$  від 3 до 5.
3. Перемістити датчик координати Linear Position у правий край динамічної доріжки.
4. Підключити датчики до інтерфейсу LabQuest2.
5. Для відображення результатів експерименту на моніторі ноутбука потрібно запустити програмне забезпечення для збору даних (Logger Lite, Grafical Vernier) та з'єднати ноутбук з LabQuest2.
6. Повільно і плавно перемістити сенсор світла по динамічній доріжці у межах видимої дифракційної картини. Для виконання руху знадобиться приблизно 30 секунд. Якщо будемо рухатись занадто швидко, датчик світла не встигне реагувати на зміни діаграми інтенсивності.
7. Отримати графік залежності інтенсивності світла від координати на екрані  $I(x)$ . Зберегти графік та дані для звіту.

Завдання 1. Визначити сталу дифракційної ґратки

- З графіка або таблиці даних визначити положення головних максимумів 1-го та 2-го порядку з обох сторін, як показано на рис. 4.4:

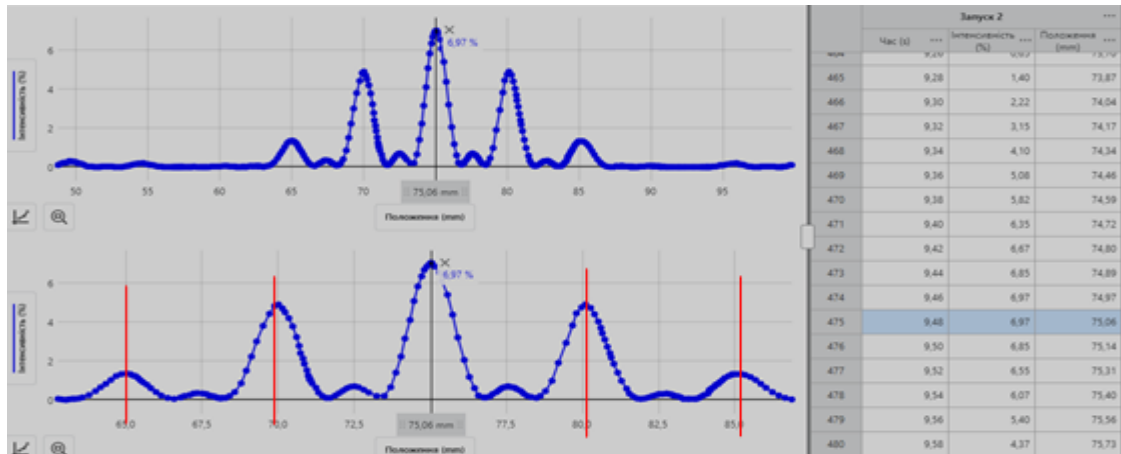


Рис. 4.4. Дифракційна картина від  $N=3$  щілини.

- Визначити за графіком (таблицею) відстань  $x$  від центру до  $m$ -го максимуму дифракційної картини, як  $|l_m - l_0| = x$ .
- Обчислити сталу ґратки  $d_i$  для кожного головного максимуму за формулою (4.6).
- Подати результат вимірювання у вигляді  $d = d_{\text{сер}} \pm \Delta d$ .
- Всі вимірювання та обчислення занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

*Обчислення сталої дифракційної ґратки  $d$ .*

Порядок максимуму, $m$	Положення головних максимумів $l_m$ , мм	$\lambda$ , нм	$L$ , мм	$d_i$ , мм	$d_{\text{сер}}$ , мм

Додаткове завдання:

Визначити ширину щілини на дифракційній ґратці

- З графіка (таблиці) визначити положення головних мінімумів 1-го порядку з обох сторін від центрального максимуму, як показано на рис. 4.5:

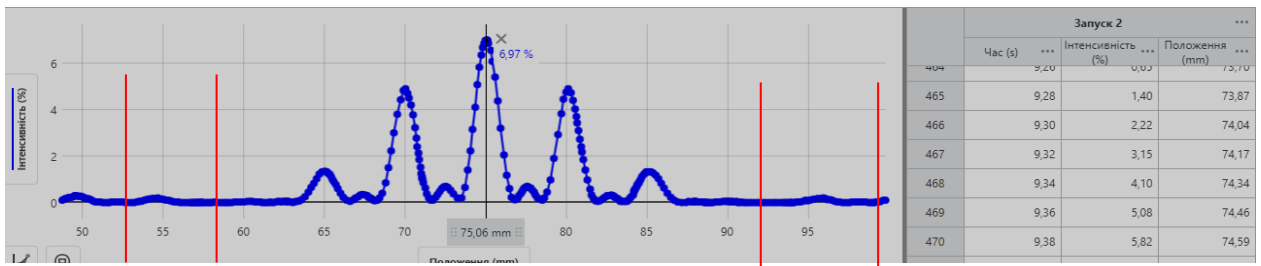


Рис. 4.5. На графіку відмічено положення головних мінімумів 1-го та 2-го порядків.

- Визначити за графіком або таблицею даних відстань  $x$  від центру до  $m$ -го мінімуму дифракційної картини, як  $|l_m - l_0| = x$ .
- Обчислити ширину щілини  $b_i$  для кожного головного мінімуму за формулою (4.7).
- Подати результат вимірювання у вигляді  $b = b_{\text{сер}} \pm \Delta b$ .
- Всі вимірювання та обчислення занести до Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

Обчислення дифракційної картини. Ширина щілини.

Порядок $m$	Положення головних мінімумів $l_m, \text{мм}$	$\lambda, \text{нм}$	$L, \text{мм}$	$x, \text{мм}$	$b_i, \text{мм}$	$b_{\text{сер}}, \text{мм}$

- Проаналізувати отримані дані, порівнявши з параметрами використаних дифракційних елементів. Зробити висновки.

## Експеримент 5.

### ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ МІКРОСКОПІЧНИХ ЧАСТИНОК

Мета: спостерігати дифракцію світла на мікрочастинках, визначити розмір мікрочастинок.

Обладнання: пластинка зі спорами лікоподію, дифракційний апарат ДАК, динамічна доріжка Vernier Dynamics з датчиком координати Linear Position, червоний або зелений лазери, екран, реєстратор даних LabQuest2.

### Теоретичні відомості

Для світлових хвиль дифракція спостерігається при їх поширенні у середовищі з різкими неоднорідностями, що обмежують або спотворюють фронт світлової хвилі. Такими неоднорідностями можуть бути мікроскопічні пилинки, краплинки води, подряпини на склі, тонкі гладенькі волокна, край леза, оправа лінзи або дзеркала та ін.

У даній роботі це лікоподій – спори плауна (*Lycoperodium*) – рослини, що росте у хвойних лісах. Форму частинок показано на рис. 5.1.а). Непрозору мікроскопічну частинку – лікоподій – можна вважати круглим диском, на якому відбувається дифракція світла.

Існує два види дифракції – дифракція Френеля і дифракція Фраунгофера. Перший вид спостерігається у так званій ближній зоні, коли відстань від перешкоди до місця спостереження невелика і треба враховувати при розрахунку дифракційної картини різні відстані від фронту хвилі до точки спостереження. Прикладами такої дифракції є дифракція Френеля на круглому отворі і круглому екрані, які розраховуються методом зон Френеля. У методі зон Френеля радіус  $m$ -ої зони визначається так:

$$r_m = \sqrt{m\lambda \frac{ab}{a+b}}, \text{ звідки } m = \frac{r_m^2}{\lambda} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right), \quad (5.1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі світла,  $a$ ,  $b$  – відстані від перешкоди до джерела і екрана. Якщо перешкода відкриває (або закриває)  $m$  зон, тобто її радіус  $r_o = r_m$ , то з (5.1) можна обчислити  $m$ . Критерієм дифракції Френеля можна вважати число

здіяних зон  $m$ , яке не перевищує декількох одиниць. Картина дифракції Френеля на круглому екрані показана на рис. 5. б). Дифракційна картина від диску має вигляд концентричних світлих і темних кілець навкруги розмитої геометричної тіні диску, причому у центрі тіні завжди знаходиться світла точка, яку називають плямою Пуассона.

Дифракція Фраунгофера – це дифракція у дальній зоні, або дифракція у паралельних променях. Якщо відстані  $a$  і  $b$  великі ( $\rightarrow \infty$ ), то число  $m$  стає  $< 1$ , що і є критерієм дифракції Фраунгофера. Практично ця умова виконується, коли розмір перешкоди  $r_0$  набагато менший відстаней  $a$  і  $b$ . При освітленні лазером можна вважати  $a \rightarrow \infty$ , тоді при досить віддаленому екрані

$$m = \frac{r_0^2}{\lambda b} \ll 1.$$

Тінь від диску відсутня, а у центрі дифракційної картини спостерігається яскрава світла пляма. Картина дифракції Фраунгофера має вигляд, як на рис. 5.1. в).

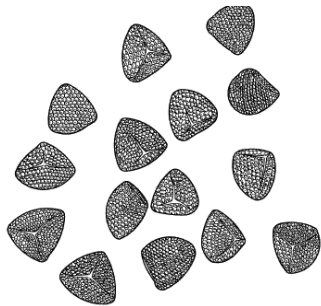
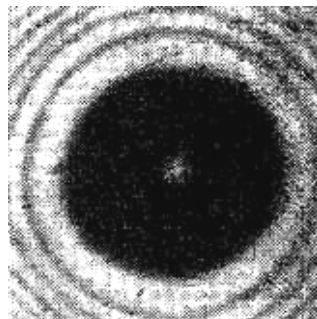
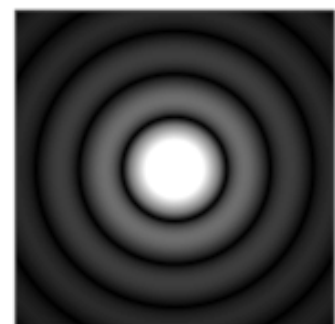


Рис.5.1. а) Лікоподій.  
Збільшено у 280 разів.



б) Дифракція  
Френеля на диску.



в) Дифракція  
Фраунгофера на  
диску.

Якщо в область світлового пучка попадає велика кількість  $N$  дрібних частинок, то інтенсивність дифракційної картини підсилюється у  $N$  разів. При освітленні вузьким лазерним променем усі частинки дають дифракційні картини дуже близько розташовані на екрані і результуюча картина буде достатньо різкою.

Розрахунок дифракційної картини Фраунгофера на диску базується на принципі Гюйгенса – Френеля та теоремі Бабіне, згідно якої картини дифракції від отвору та диску (додаткові екрани) співпадають в усіх точках, крім центральної. У теорії дифракції доведені формули, що пов'язують кут дифракції  $\varphi$  з діаметром диску  $D$  та довжиною хвилі світла:

для темних (непарних) кілець:

$$\begin{aligned} D \sin \varphi_1 &= 1,22\lambda ; \\ D \sin \varphi_3 &= 2,22\lambda ; \\ D \sin \varphi_5 &= 3,24\lambda \end{aligned} \quad (5.2)$$

(нумерація кілець починається з першого темного кільця).

Для визначення діаметру частинок  $D$  необхідно знати кут дифракції  $\varphi_i$  та довжину світлової хвилі  $\lambda$ . Зважаючи, що кут  $\varphi_i$  малий, можна знайти його через діаметр  $i$ -го темного кільця  $d_i$  та відстань  $L$  між зразком (пластинкою з лікоподієм) і екраном:

$$\varphi_i \approx \text{tg} \varphi_i = \frac{d_i}{2L} \quad (5.3)$$

Величини  $d_i$  та  $L$  показані на схемі досліду (рис. 5.2).

У дослідах, що виконуються без затемнення приміщення, найбільш чітко видно перше темне кільце, тому остаточну розрахункову формулу для визначення розміру частинок лікоподію можна записати у вигляді:

$$D = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d_1/2L} = 2,44 \cdot \frac{\lambda \cdot L}{d_1}, \quad (5.4)$$

де  $d_1$  – діаметр першого темного кільця.

Для обчислень з розміру другого темного кільця:

$$D = 2,22 \cdot \frac{\lambda}{d_2/2L} = 4,44 \cdot \frac{\lambda \cdot L}{d_2} \quad (5.5)$$

### Попередні запитання

- Дайте визначення явища дифракції світла.
- Чим відрізняються дифракція Френеля і дифракція Фраунгофера?
- В чому полягає метод зон Френеля?
- Який вид має дифракційна картина від диска і як вона пояснюється з точки зору зонної теорії Френеля?
- Чому при дифракції Фраунгофера в центрі дифракційної картини від диска завжди спостерігається світла пляма?
- Чи відрізняються дифракційні картини від диска і круглого отвору у дифракції Фраунгофера?
- Як впливає явище дифракції на роздільну здатність оптичних приладів?

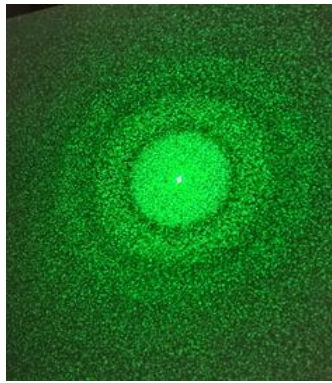
### Порядок роботи

1. Використати дифракційний апарат ДАК з динамічною доріжкою Vernier Dynamics і датчиком координати Linear Position, червоний або зелений лазер.
2. На штативі поряд лазером закріпити пластинку з лікоподієм на достатній відстані від екрана (40 – 60 см) як показано на рис. 5.2.



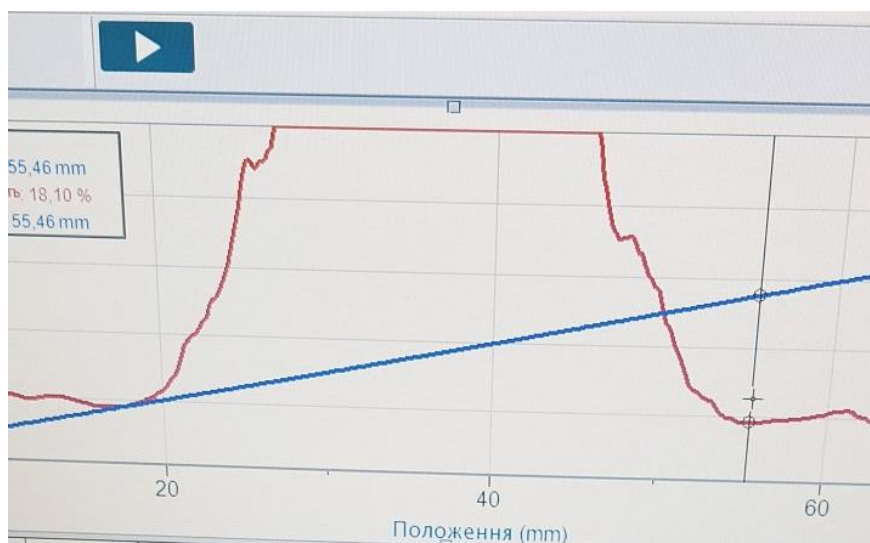
*Рис. 5.2. Установка для визначення розміру мікрочастинок.*

3. Увімкнути лазер і на екрані спостерігати дифракційну картину у вигляді концентричних світлих та темних кілець. Переміщуючи пластинку, добитися найбільш чіткої дифракційної картини на екрані:



На екрані у затемненому приміщенні можна спостерігати до трьох темних кілець.

4. Підключити датчики до інтерфейсу LabQuest2.
5. Для відображення результатів експерименту на моніторі ноутбука потрібно запустити програмне забезпечення для збору даних (Logger Lite, Grafical Vernier) та з'єднати ноутбук з LabQuest2.
6. Встановити чутливість сенсора світла поворотом диска до положення  $0,5 - 1,0$  мм вхідного отвору.
7. Гвинтами для регулювання напрямку лазерного променя на корпусі лазера добитись того, щоб промінь попадав у центр сенсора світла.
8. Повільно і плавно перемістити сенсор світла по динамічній доріжці у межах видимої дифракційної картини. Отримати графік залежності інтенсивності світла від координати на екрані  $I(x)$ :



9. Знайти з графіка положення перших мінімумів ліворуч і праворуч від центра картини  $x_1$  і  $x_2$ , та обчислити діаметр першого темного кільця:



$$d_1 = |x_1 - x_2|$$

10. Виміряти відстань  $L$  від пластинки до екрана (сенсора).
11. За формулою (5.4.) розрахувати середній діаметр мікрочастинки – лікоподію.
12. Повторити дослід при різних відстанях  $L$ .
13. Обчислити середнє значення та похибку експерименту. Результат представити у вигляді:

$$D = \bar{D} \pm \Delta D$$

14. Порівняти результат з відомими даними. Зробити висновок.

## Експеримент 6.

### ПОЛЯРИЗАЦІЯ СВІТЛА. ЗАКОН МАЛЮСА. ФОТОПРУЖНИЙ ЕФЕКТ

Мета: спостерігати явище поляризації, перевірити закон Малюса, спостерігати фотопружний ефект.

Обладнання: аналогово-цифровий перетворювач LabQuest2, оптична лава Vernier Track 1,2 м, джерело білого світла, поляризатор, аналізатор, пластикова лінійка, екран.

#### Теоретичні відомості

Група явищ, пов'язаних з поперечністю хвиль називаються явищами *поляризації*. Розрізняють *природне* і *поляризоване світло*. У природному світлі вектор напруженості поля світлової хвилі  $\vec{E}$  змінюється хаотично в часі і просторі, але перпендикулярно до напрямку променя. Причиною є той факт, що атоми джерела випромінюють світло не узгоджено. Світло називають *поляризованим*, якщо коливання вектора напруженості поля світлової хвилі  $\vec{E}$  відбувається у просторі впорядковано певним чином (Рис. 6.1.).

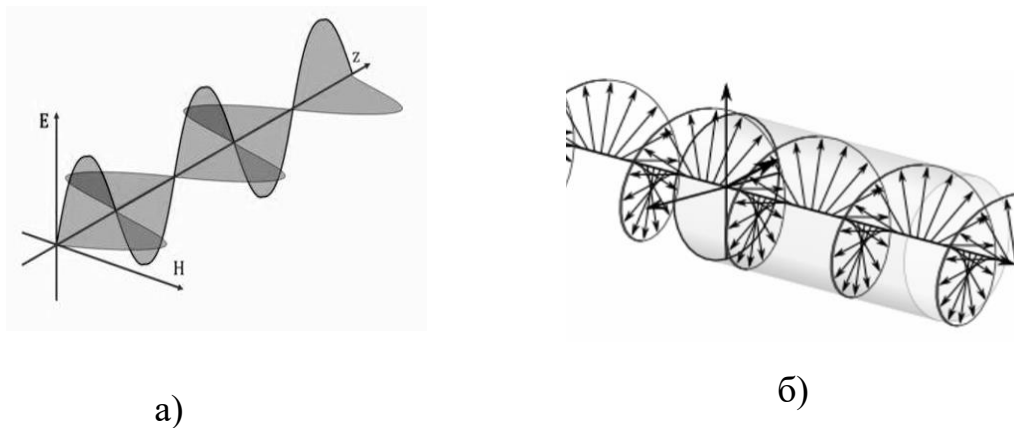


Рис. 6.1. Плоско поляризоване (а) та еліптично поляризоване (б) світло.

Для отримання та аналізу плоскополяризованого світла застосовують *поляризатори* – пристрої, що перетворюють природне світло у плоско поляризоване. Основна властивість поляризаторів та, що вони пропускають лише такі хвилі, у яких площина поляризації падаючої хвилі (вектор  $\vec{E}$ )

співпадає з їхньою площиною поляризації (пропускання) (PP на рис 6.2.) і повністю затримують світло з перпендикулярною поляризацією.

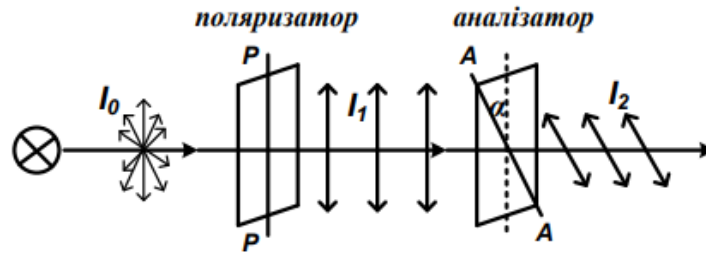


Рис. 6.2. Схема отримання поляризованого світла.

Якщо розташувати послідовно за джерелом світла два поляроїди, то перший поляроїд називають поляризатором (з нього виходить плоскополяризоване світло, причому вектор  $\vec{E}$  коливається вздовж напрямку вісі поляроїда PP). Другий поляроїд називають аналізатором, він дозволяє виявити поляризоване світло, оскільки людське око не розрізняє природне і поляризоване світло. Після аналізатора коливання вектора  $\vec{E}$  відбувається вздовж напрямку AA – площини поляризації (пропускання) аналізатора.

За законом Малюса інтенсивність світла  $I_2$ , яке проходить через аналізатор, пропорційна квадрату косинуса кута  $\alpha$  між площинами поляризатора і аналізатора (PP і AA):

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha \quad (6.1)$$

де  $I_0$  - інтенсивність природного світла,  $I_1$  - інтенсивність світла, що виходить з поляризатора,  $I_2$  - інтенсивність світла, що виходить з аналізатора.

Поляризатори виготовляють з анізотропних кристалів або інших речовин, які проявляють подвійне променезаломлення – природне або штучне.

Практично отримати подвійне променезаломлення для застосування у фізичних дослідженнях і пристроях можна не тільки у кристалах, але, частіше, створивши *штучну анізотропію* в однорідних ізотропних речовинах – пластмасах, рідинах. Так, штучну анізотропію спостерігають у *фотопружному ефекті*. Він виникає у твердому ізотропному середовищі, в якому створено механічну напругу  $\sigma$ . Оптична вісь виникає вздовж

прикладеної сили. Мірою анізотропії слугує різниця показників заломлення звичайного  $n_0$  і незвичайного  $n_e$  променів, яка пропорційна механічній напрузі  $\sigma = F/S$  :

$$n_0 - n_e = k\sigma \quad (6.2)$$

Якщо таке тіло помістити між поляризатором і аналізатором, то можна спостерігати кольорову інтерференційну картину, де неперервні лінії кольору відповідають однаковим механічним напругам. Це явище застосовують при моделюванні і дослідженні об'єктів з механічними напругами.

### Попередні запитання

- Яке світло називається поляризованим? Чим воно відрізняється від природного?
- Що розуміють під площиною поляризації?
- Сформулюйте закон Малюса і дайте малюнок до нього.
- Що таке фотопружний ефект?
- Від чого залежить різниця ходу звичайного і незвичайного променів у фотопружному ефекті?
- Чому різній механічній напрузі відповідає різний колір смуг?

### Порядок роботи

#### Завдання 1. Перевірка закону Малюса.

Дослідна установка (рис. 6.3) складається з розміщених на оптичній лаві джерела світла, поляризатора з фіксацією кута повороту (Vernier-датчик обертального руху RMV-BTD), аналізатора, сенсора освітленості (LS-BTA):

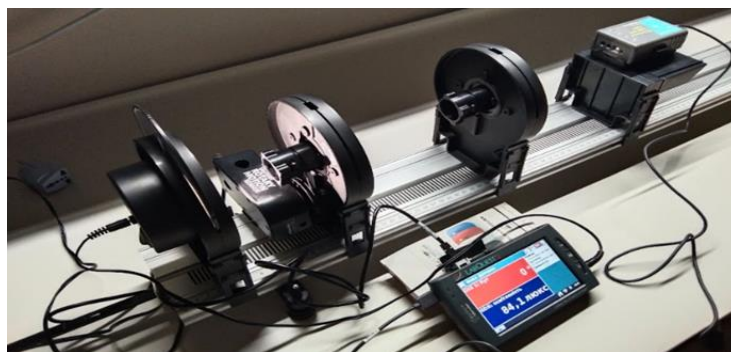
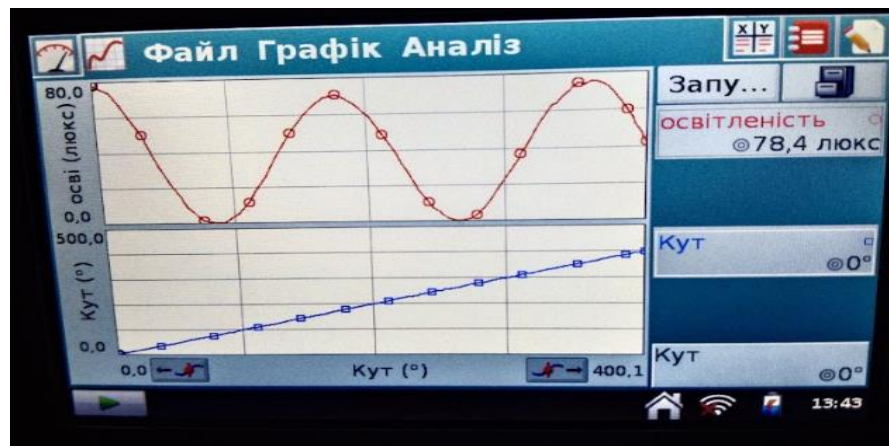


Рис.6.3. Схема установки для дослідження закону Малюса.

1. Підключити датчик кута повороту RMV-BTD і освітленості LS-BTA до пристрою LabQuest2.
2. При обертанні поляризатора LabQuest2 одночасно фіксує кут повороту та інтенсивність світла, що пройшло через поляризатор та аналізатор. На екрані інтерфейсу збору даних маємо одночасно графік зміни кута повороту поляризатора і інтенсивності світла (рис. 6.4).



*Рис. 6.4. Графік зміни інтенсивності світла, що пройшло через систему поляризатор-аналізатор.*

3. Заходячи в таблицю даних через кнопку X|Y маємо цифрові дані цього графіка.
4. За графіком чи таблицею даних визначити період зміни інтенсивності світла.
5. Виконати аналіз отриманої залежності, скориставшись функцією «Аналіз» → Крива Fit →  $\cos^2 \alpha$ . На екрані з'явиться крива апроксимації, яка повинна співпасти з експериментальною.
6. Зробити висновок щодо справедливості закону Малюса.

### Завдання 2. Спостереження фотопружного ефекту.

1. Залишити на динамічній доріжці джерело світла, поляризатор і аналізатор.
2. За аналізатором встановити екран.

3. У простір між поляризатором і аналізатором внести пластикову лінійку, або будь-який предмет з пластику.
4. Спостерігати на екрані кольорову картину інтерференції звичайної і незвичайної хвилі у різних місцях лінійки.
5. Обертати поляризатор або аналізатор і спостерігати зміну кольорів на екрані. Пояснити явище.
6. Внести у простір між поляризатором і аналізатором плівку целофану. Розтягнути її. Побачити зміну картини на екрані. Пояснити фотопружний ефект.

## РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: підручник: у 3 т. Т.3: Оптика. Квантова фізика. Київ, Техніка, 2006. – 518 с.
2. Сучасний демонстраційний фізичний експеримент : методичні рекомендації до навчальної практики для студентів спеціальності 014(08) Середня освіта (Фізика) / В.М. Кадченко. Кривий Ріг : Криворізький державний педагогічний університет, 2023. – 86 с.
3. Загальна фізика. Оптика: оглядові лекції для студентів фізико-математичного факультету спеціальності 014 Середня освіта (Фізика) / Укл. В. М. Кадченко. Кривий Ріг: Кривор. держ. пед. ун-т, 2020. – 70 с.
4. LabQuest2. Керівництво з експлуатації.  
<https://drive.google.com/file/d/1FzY2LSz4JaqbT-k12FSKiDtQH5oxY6EK/view>

## ДОДАТКИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТЗАТВЕРДЖУЮ  
РЕКТОР\_\_\_\_\_  
–  
Проф. Я. В. ШРАМКО

«

» \_\_\_\_\_ 2021 року

КОД НС – 21/02/2021

ІНСТРУКЦІЯ № 21/02/2021

З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ

В НАВЧАЛЬНО-НАУКОВІЙ ЛАБОРАТОРІЇ ФІЗИКИ

Навчально-наукова лабораторія з фізики обладнана цифровими комплектами електромеханічного обладнання; вимірювальних приладів термодинамічних параметрів; електронного обладнання; оптичних приладів, які сумісні з аналого-цифровим перетворювачем Vernier LabQuest2 та аналого-цифровим перетворювачем-транслятором для збору даних Vernier LQ-STREAM, та демонстраційним обладнанням з електродинаміки та оптики.

Все обладнання лабораторії, в тому числі стенди і вимірювальні прилади, під'єднуються до електромережі напругою 220 В, та мають перетворювачі для зниження до постійної напруги до 5 - 30 В, або працює від акумулятора 5 В.

Значення напруг при аналізі електричних кіл на стендах, не становлять небезпеки для життя людини. Усі джерела живлення забезпечені захистом від перевантажень. Тому збирання, перевірку і включення електричних кіл



студенти можуть проводити самостійно, відповідно до планів аудиторних занять. що вимагає суворого дотримання правил техніки безпеки.

Комплекти обладнання з оптики містять джерела світла: світлодіоди, червоний лазер 636 нм, зелений лазер 532 нм. Потужність джерел не перевищує 1мВт, лазери відносяться до 2 класу небезпеки: малопотужні видимі лазери, здатні заподіяти ушкодження людському оку в тому випадку, якщо спеціально дивитися безпосередньо на лазер протягом тривалого періоду часу. Такі лазери не слід використовувати на рівні голови.

1. До роботи у лабораторії допускаються особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки з наступним записом про це в журналі;

2. Особи, які порушили вимоги техніки безпеки, несуть відповідальність згідно з чинним законодавством України;

3. Забороняється знаходитись у лабораторії без викладача або лаборанта;

4. Забороняється входити до лабораторії у верхньому одязі та з їжею;

5. До особливо небезпечних факторів для здоров'я та життя людини відносяться:

- джерела високої напруги (більше 36 В);
- джерела високої температури;
- радіоактивні матеріали;
- різноманітні випромінювання;
- ефір, луги та кислоти;
- скляні прилади;
- обертові та рухомі деталі механізмів.

6. Перед виконанням роботи слід отримати допуск, який свідчить про те, що студент підготовлений до занять (вивчив теоретичний матеріал, підготував чернетку, зробив необхідні попередні розрахунки). Експериментальні дані, занесені в чернетку, наприкінці кожного досліду слід надати викладачеві. У разі невірних результатів досліди повторити;

7. Виконувати роботу в складі бригади не більше 3 осіб;
8. Збирання і розбирання електричної схеми виконувати при відключеній напрузі живлення;
9. Під час роботи з обладнанням забороняється голосно розмовляти, ходити по лабораторії, залишати лабораторію без дозволу викладача;
10. Під час знаходження у лабораторіях категорично забороняється:
  - вмикати електричні кола без дозволу викладача або лаборанта;
  - доторкатися до частин приладів, які знаходяться під напругою;
  - збирати і здійснювати різні перемикання приладів у електричних схемах під напругою;
  - відключати заземлення вимірювальних приладів;
  - виймати блоки стенда;
  - залишати без нагляду включений стенд і вимірювальні прилади;
  - працювати з радіоактивними матеріалами без використання засобів біологічного захисту;
  - користуватися приладами, інструментами, технічними засобами навчання не за призначенням;
11. У разі пошкодження блоків стенда, елементів обладнання або вимірювальних приладів негайно відключити їх від мережі живлення і сповістити про це викладача;
12. По закінченні роботи виключити живлення всіх активних блоків і вимірювальних приладів;
13. Заборонено палити, користуватися відкритим вогнем;
14. При виявленні ознак пожежної небезпеки негайно припинити роботу, вимкнути живлення, сповістити про ситуацію викладача, керівництво кафедри та покинути лабораторію;
15. Небезпечні ситуації, що можуть виникнути у навчально-науковій лабораторії фізики:

- Враження електричним струмом внаслідок неуважного поводження з електроприладами:
- Негайно відключити електроприлад від мережі. Якщо потерпілий втратив свідомість і не подає ознак життя, негайно приступити до непрямого масажу серцевого м'язу та штучного дихання. Одночасно сповістити керівництво кафедри та деканату.
- Термічний опік при роботі з нагрівальними приладами:
- Якщо є ознаки опіку II або III ступеня, негайно сповістити викладача, керівництво кафедри та деканату, викликати швидку медичну допомогу. Обпечене місце якомога довше промивати холодною водою, можна накласти на нього сніг, лід.
- Падіння приладу на ноги внаслідок необережного поводження з ним:
- Якщо виник перелом кінцівки або пальця, зафіксувати кінцівку або палець шиною та викликати швидку медичну допомогу;
- Механічні ушкодження пальців або інших частин тіла при необережному поводженні з обертовими (рухомими) механізмами:
- Зупинити кровотечу тугою пов'язкою, викликати швидку медичну допомогу.

РОЗРОБИВ:

\_\_\_\_\_

В.М. Кадченко

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_

М.А. Слюсаренко

Інженер з охорони праці

\_\_\_\_\_

Л.В. Тулович