

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

**АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

\_\_\_\_\_ (позначення документа)

Компактний спектрофотометр для дослідження спектрального складу  
джерел оптичного випромінювання

\_\_\_\_\_ (тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи ЕППм 18-1

Каленький С. О.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка  
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник Доцент кафедри МЕЕПП, к. физ.-  
мат. наук Фролова Т.І. (посада,  
прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Бондаренко І.М.  
(прізвище, ініціали)

2019р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)  
Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 171 «Електроніка»  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Каленському Сергію Олександровчу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «КОМПАКТНИЙ СПЕКТОФОТОМЕТР ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ  
СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ДЖЕРЕЛ ОПТИЧНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ»

затверджена наказом по університету від 04 11 2019 р. № 1635 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії грудня 2019р.

3. Вихідні дані до роботи Спектрометр USB 4000 Ocean Optics  
Спектральний діапазон 200-1100 нм, оптичне розділення 0.3-10 нм, розмір пікселя 8×200 мкм. Використовується 16-розрядний аналого-цифровий перетворювач, лінійний ПЗС-детектор Toshiba TCD1304AP.

Ртутно-аргонове джерело випромінювання HG - 1, яке має спектральний діапазон 253 -1700 нм; оптичний роз'єм SMA 905. Довжина хвилі сильних емісійних ліній ртуті 253.65 – 365.02 нм. Довжина хвилі сильних емісійних ліній аргону 696.54 – 751.47 нм.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_  
1.Принцип дії спектрофотометра  
2. Виконати порівняльний аналіз штучних джерел світла та оптичного випромінювання  
3. Оцінити сучасні спектрофотомети, ПЗС-лінійки, спектральні характеристики

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

1. Схема електрична принципова \_\_\_\_\_

2. Презентація \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел	04.11.19	Виконано
2	Дослідження спектральних характеристик		Виконано
3	Аналіз оптичного випромінювання		Виконано
4	Переваги та недоліки спектрофотометрів		Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки		Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів		Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії		Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи		Виконано

Дата видачі завдання 03 листопада 2019 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_ (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 67 с., 26 рис., 22 джерел, 3 додатки.

### ОПТИЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ДЖЕРЕЛО СВІТЛА, СПЕКТРАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ПЗС ЛІНІЙКА, СПЕКТР, СПЕКТРОФОТОМЕТР

Об'єктом дослідження – є процес вимірювання розподілу потужності випромінюючої енергії джерел світла.

Предмет дослідження – калібрування спектрометрів по довжині хвилі в області як видимого діапазону, так і областей інфрачервоного і ультрафіолетового випромінювання.

Мета роботи – створення програми розрахунку калібрувальних коефіцієнтів по довжині хвилі для компактних спектрометрів.

Метод дослідження – теоретичні методи для обробки результатів вимірювання, зокрема метод лінійної регресії третього порядку.

В роботі було розглянуто принципи роботи спектрометрів для вимірювання спектрального розподілу потужності вихідного оптичного випромінювання штучних джерел світла і проаналізовано їх переваги і недоліки. Для коректних вимірювань довжини хвиль недостатньо мати вихідні дані спектрометра, також необхідна коректна індикація рівня яскравості на кожній довжині хвилі. Невдача в коригуванні може привести до вельми невірних результатів вимірювання, тому необхідно проведення калібрування спектрометрів з часом, а також при зміні навколишнього середовища можливий невеликий дрейф шкали довжин хвиль. В процесі калібрування необхідно знаходити коефіцієнти, які є унікальними для кожного окремого спектрометра,

що зберігаються в його вбудованій пам'яті (EEPROM). В роботі було створено програму для розрахунку калібрувальних коефіцієнтів по довжині хвилі використовуючи редактор електронних таблиць Microsoft Excel.

Спектральні дослідження за допомогою спектрометрів оптичному діапазоні спектра, включаючи УФ, видимий та ІЧ області довжин хвиль, широко застосовуються в наукових і промислових лабораторіях, в біології та медицині, хімії та хімічних технологіях, колориметрії та ін.

## ABSTRACT

Explanatory note contains: 67 pp., 26 figures, 22 sources, 3 appendices.

OPTICAL RADIATION, LIGHT SOURCE, SPECTRAL CHARACTERISTICS, CCD LINE, SPECTRUM, SPECTROPHOTOMETER

The object of the study is the process of measuring the power distribution of the radiant energy of light sources.

The subject of the study is the calibration of spectrometers along the wavelength in the region of both the visible range and areas of infrared and ultraviolet radiation.

The purpose of the work is to create a program for calculating the wavelength coefficients for compact spectrometers.

Research Method - Theoretical methods for processing measurement results, in particular the third-order linear regression method.

The principles of operation of spectrometers for measuring the spectral power distribution of the output optical radiation of artificial light sources are considered in the paper and their advantages and disadvantages are analyzed.

## ЗМІСТ

1 ОПТИЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ШТУЧНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА .....	7
1.1 Оптичне випромінювання і його характеристики .....	7
1.2 Джерела оптичного випромінювання.....	11
1.2.1 Когерентні джерела світла.....	11
1.2.2 Некогерентні джерела світла.....	13
1.2.3 Фотометричні величини .....	17
1.2.4 Спектральна характеристика .....	21
1.3 Прилади для дослідження оптичного випромінювання .....	24
1.4 Спектрофотометр і його принцип роботи .....	30
1.5 ПЗС Лінійка.....	31
1.6 Сучасні спектрофотометри .....	35
2 КАЛІБРУВАННЯ КОМПАКТНОГО СПЕКТРОМЕТРА .....	43
2.1 Постановка завдань .....	43
2.2 Калібрування по довжині хвилі.....	43
1.7 Висновки .....	50
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	51
ДОДАТОК А .....	53
ДОДАТОК Б .....	54
ДОДАТОК В .....	55

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

FRF – еталонний фільтр Фабрі-Перо

АЦП – аналоговий цифровий прилад

ДРЛ – Дугова Ртутна Люмінофорна

ІЧ – Інфрачервоне випромінювання

МДП – метал - діелектрик - напівпровідник мфм

Мікро ЕОМ – електронні обчислювальні машини

МОП – метал-оксид-напівпровідник

ОС – оптична система

ПЗС – прилади із зарядовим зв'язком

УФ – ультрафіолет

ФПЗС – фоточутливий прилад із зарядовим зв'язком

# 1 ОПТИЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ШТУЧНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА

## 1.1 Оптичне випромінювання і його характеристики

Джерелом оптичного випромінювання прийнято називати прилад, що перетворює будь-який вид енергії в енергію електромагнітного випромінювання оптичного діапазону спектру, тобто в області  $10 - 10^6$  нм [1]. Вказаний діапазон поділяють на три області: 1) ультрафіолетову (довжина хвиль  $\lambda=10-380$  нм; враховуючи певну різницю в ефективності дії, вказану область іноді поділяють на ближній, середній та дальній ультрафіолет); 2) видиму з довжинами хвиль  $380 - 770$  нм; 3) інфрачервону з довжинами хвиль  $770$  нм –  $100$  мкм (під діапазони:  $770$  нм –  $1,5$  мкм  $1,5$  мкм –  $5,6$  мкм і  $5,6$  мкм –  $100$  мкм – відповідно ближнє, середнє та дальнє інфрачервоне випромінювання) (рис. 1.1). Генерація оптичного випромінювання пов'язана зі зміною енергетичних станів атомів (електронів та іонів) [2].

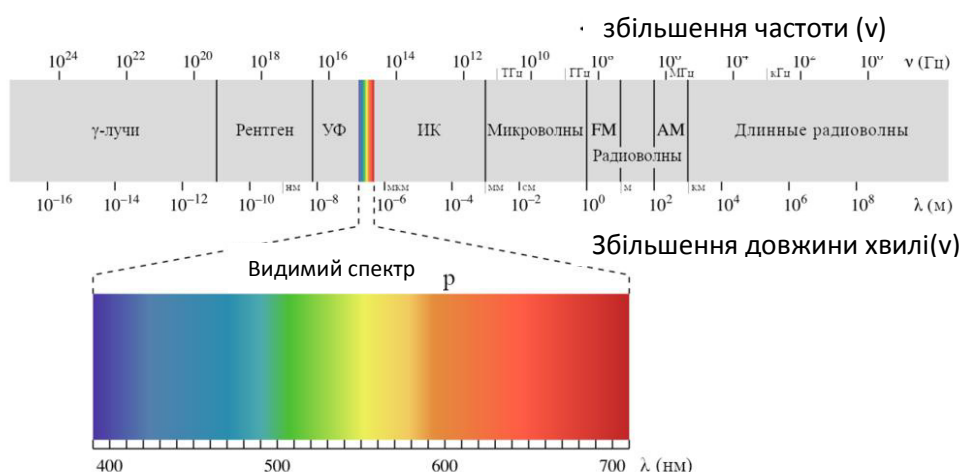


Рисунок 1.1 – Спектр світла - частина спектра електромагнітного випромінювання

Спектральний розподіл енергії випромінювання визначається енергетичними станами, котрі можуть приймати електрони й іони в результаті поглинання енергії. Так як приймачі оптичного випромінювання по спектральним характеристикам, енергетичним показникам, конструктивному виконанню і умовам експлуатації доволі різноманітні, а джерела випромінювання різних типів при тому чи іншому виконанні можуть бути реалізовані в широко варійованих (по формі й матеріалу) колбах. Можливості джерел випромінювання суттєво розширилися після розробки і освоєння промисловістю оптичних квантових генераторів (лазерів). Сучасні джерела оптичного випромінювання забезпечують необхідні рівні освітленості, достатньо економічні, дозволяють відтворювати природні кольори.

Як будь-яка електромагнітна хвиля, світло може бути поляризованим. У лінійно поляризованого світла визначена площина, в якій відбуваються коливання електричної складової електромагнітної хвилі. Кількісно інтенсивність світла характеризують за допомогою фотометричних величин декількох видів. До основних з них відносяться енергетичні і світлові величини [3]. Енергетичною величиною відповідає аналог – світлова фотометрична величина. Світлові величини відрізняються від енергетичних тим, що оцінюють світ за його здатності викликати у людини зорові відчуття.

Для отримання двох когерентних між собою променів у оптиці використовують розділення початкового променя світла. Один із способів зробити це – поставити на шляху променя плоско паралельну пластинку. Тим самим частина світла буде відбиватися від пластинки, а частина проходити далі. Використовуючи лінзи та дзеркала, можна спрямувати розділені промені так, щоб вони знову перетиналися, подолавши різний шлях. Термін когерентність використовується також для хвильових функцій у квантовій механіці. Коли хвиля проходить через середовище, її когерентність поступово втрачається завдяки процесам розсіювання. Відстань, на якій когерентність зберігається, називають довжиною когерентності.

Поняття про часову і просторову когерентність. Когерентність – це протікання в часі та просторі декількох коливальних хвильових процесів [4]. Цю умову задовольняють монохроматичні хвилі. Однак жодне реальне джерело не дає абсолютного монохроматичного світла, а хвилі, які випромінюються будь-якими незалежними джерелами, завжди некогерентні. Якщо мовити про фізичну причину, що атоми випромінюють кванти світла незалежно один від одного, спонтанно. Виходить що амплітуда і фаза випромінюваного світла безладно змінюються. Довжина когерентності – це відстань, на яку поширюється хвиля за час когерентності, на протязі якого амплітуда і фаза можна вважати незмінними. Когерентність коливань, які здійснюються в одній і тій же точці простору і визначаються ступенем монохроматичності хвиль та буде називатися часовою когерентністю. Фаза хвилі змінюється не тільки вздовж напрямку поширення, але і в площині, перпендикулярній до цього напрямку.

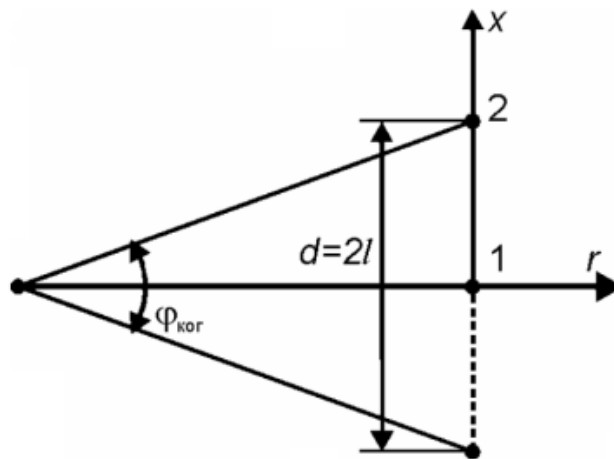


Рисунок 1.2 – Просторова когерентність

Ступінь просторової когерентності це як кореляція двох хвиль в фіксований момент часу, що приходять в дві точки в площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження.

$$R_x(I) = \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x) E_2(x+I) dx \quad (1.1)$$

Значення  $I = d/2$ , при якому

$R(I) = 0,5$  визначає коло діаметром  $d$ .

Мірою просторової когерентності є розбіжність пучка. Для повністю когерентного випромінювання дифракційна розбіжність становить  $2q_{0,5} = \Delta\phi = \lambda/L$  (граничне значення), а при частковій когерентності розбіжність збільшується. Можна виділити також обсяг когерентності  $V_{\text{ког}} = \pi d^2/4$ , в якому ступінь когерентності не менше 0,5.

## 1.2 Джерела оптичного випромінювання

Джерела оптичного випромінювання поділяють на теплові та люмінесцентні. В теплових джерелах випромінювання виникає при нагріванні тіла або розжарюванням до високої температури. В люмінесцентних – свічення виникає в результаті перетворення тих чи інших видів енергії. Джерела оптичного випромінювання світла прийнято ділити на три класи:

- теплові, до яких відносять усі типи ламп розжарювання, у тому числі галогенні, вугільні дуги, електричні інфрачервоні нагрівачі;
- люмінесцентні, до котрих відносять люмінесцентні лампи низького тиску, дугові ртутні лампи типу ДРЛ, різноманітні лампи тліючого розряду, лампи дугового, високочастотного та імпульсного розряду. Дуги високої інтенсивності це змішане випромінювання, в котрих одночасно присутнє теплове та люмінесцентне випромінювання.

### 1.2.1 Когерентні джерела світла.

Лазер – це пристрій, що перетворює енергію накачування (світлову, електричну, теплову, хімічну) в енергію когерентного, поляризованого і вузько

направленого потоку випромінювання. Основна робота лазера виконує квантове механічні явища вимушеного (індукованого) випромінювання. Для отримання лазерного випромінювання використовуються тверді, рідкі та газоподібні матеріали. Довжина хвилі лазерного випромінювання може бути будь-якого спектрального діапазону від ультрафіолетового до інфрачервоного. Випромінювання лазера може бути або безперервним, що характерно для більшості газових лазерів: гелієвих, аргонових, неонових або імпульсним [4]. Принцип дії лазера ґрунтується, як на фото фізичних законах, так і на законах оптики. У деяких схемах робочий елемент лазера використовується в якості оптичного підсилювача для випромінювання від іншого джерела:

- лазери мають високу когерентність (просторової та тимчасової), що дозволяє їх використовувати в якості ідеального точкового джерела світла;
- випромінювання лазера монохроматичне, причому довжину хвилі випромінювання можна перебудувати;
- лазерний промінь можна сфокусувати до субмікронних розмірів.

Основною вимогою отримання лазерного випромінювання є забезпечення тривалого часу життя порушеної електронного стану атомів або молекул, що досягає інверсного рівня, завдяки чому більшість частинок залишаються в своєму збудженому ( $W_2$ ), а не основному ( $W_1$ ), стані [1]. У триповерхових лазерах перехід в активний стан  $W_2$  досягається за допомогою внутрішньої конверсії з більш високого енергетичного рівня  $W_3$ .

Прикладів лазера такого типу є рубіновий лазер, в якому активним матеріалом є іони хрому Cr, впроваджені в  $AL_2O_3$ . Такий лазер випромінює червоне світло з довжиною хвилі 694,2 нм [12].

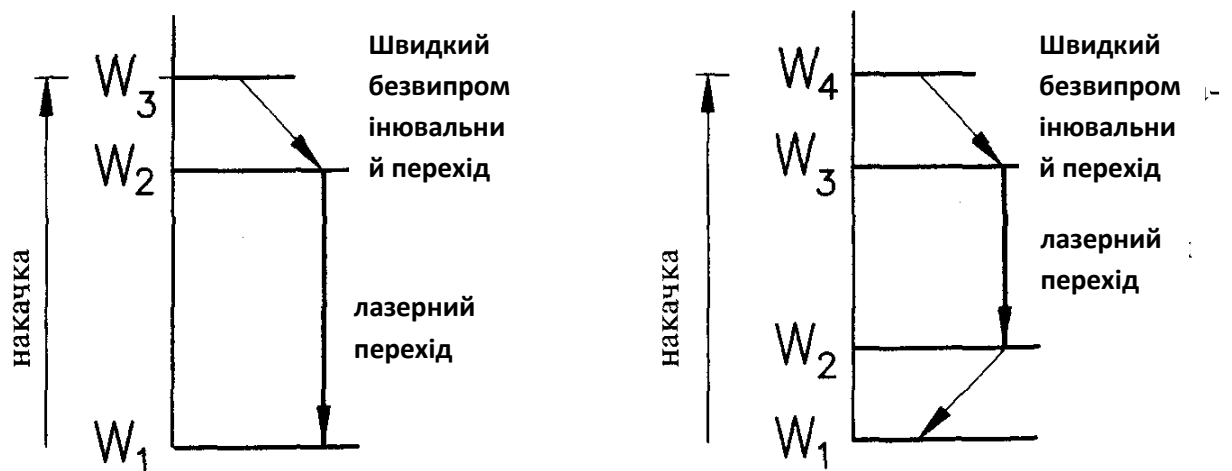


Рисунок 1.3 – Порівняння принципів роботи трьох і чотирьох рівневого лазерів

Трьох рівневий лазер: накачування енергії з  $W_1$  до  $W_2$  стану завершується поверненням на рівень  $W_1$  через метастабільний стан  $W_1$ , що визначає стимульований лазерний перехід  $W_2 - W_1$ .

Чотирьох рівневий лазер: отримання інверсії заселення отримати набагато легше з огляду на те, що до вимушеної емісії стан  $W_2$  зовсім порожній [1].

Щоб два фотона, що виникли в результаті стимульованого переходу зверху-вниз ініціювали щепною реакцією, матеріал лазера та лазерний випромінювач поміщають в оптичний резонатор, утворений дзеркалами на обох кінцях камери. Це забезпечує багаторазове проходження випромінювання через матеріал лазера. Лазері які застосовуються в оптичній спектроскопії слід додати азотний лазер з основною довжиною хвилі випромінювання 337 нм. Середня потужність типових лазерів становить від 1 мВт до декількох Вт. Інтенсивність випромінювання імпульсних лазерів вище, ніж лазерів з безперервним випромінюванням і може бути регульована коливанням резонатора.

### 1.2.2 Некогерентні джерела світла

Світлові джерела. Розрізняють два типи основних світових джерел. Перший тип це – тепловий випромінювач, який розігрівають до тих пір, поки

він, відповідно до закону Планка не починає випромінювати світло. Лампи розжарювання є типовими тепловими випромінювачами. Другий тип джерел світла – це люмінесцентні випромінювачі, принцип дії яких заснований на порушенні електронів атомів, які при релаксації випромінюють світло [18]. Основними люмінесцентними джерелами світла, застосовуваними в спектроскопії, є газорозрядні лампи, світло випромінюючі діоди і лазери.

Джерела можуть бути з безперервним спектром випромінювання, які характеризуються розподілом енергії в широкому спектральному діапазоні, і лінійні випромінювачі, енергія яких зосереджена тільки в одній або декількох розділених лініях спектра. Квантова ефективність світлового джерела визначається відношенням потужності потоку випромінювання до прикладеної потужності [14]. Відповідно до закону Планка, кожне ідеальне чорне тіло (тобто таке тіло, яке поглинає всі падаючі на нього кванти) випромінює електромагнітне випромінювання в діапазоні  $d\lambda$ :

$$L_e d\lambda = \left[ \frac{hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \right] \times \Omega_0 d\lambda \quad (1.2)$$

де  $h$  – постійна Планка;

$L_e$  (Л) – спектральне випромінювання;

$c$  – швидкість світла;

$k$  – постійна Больцман;

$T$  – абсолютна температура в градусах Кельвіна (К);

$\Omega_0$  – тілесний кут.

Всі нечорні теплові випромінювачі називаються сірими. Вони характеризуються спектральним розподілом енергії в випромінюваному світлі при меншій сумарній енергії випромінювання.

Різноманітні джерела некогерентного оптичного випромінювання можна розділити на такі групи: теплові, газорозрядні, люмінесцентні, світло діоди,

штучні та природні об'єкти. Джерела випромінювання називаються некогерентними, якщо між окремими порціями випромінювання немає певних фазових співвідношень [2]. При накладанні світла від двох незалежних джерел не вдається спостерігати явища інтерференції. Таким чином, хвилі, які випромінюються незалежними джерелами світла, некогерентні. Випромінювання світла відбувається в процесі переходу атомів із збудженого стану в нормальний. Через деякий час атом знову може збудитися і почати випромінювати світлові хвилі, але уже з іншою початковою фазою. Оскільки різниця фаз між випромінюванням двох таких незалежних атомів змінюється при кожному новому акті випромінювання, то хвилі, що спонтанно випромінюються атомами будь-якого джерела світла, некогерентні. Виходить, що хвилі які випромінюються атомами, лише протягом інтервалу часу мають приблизно сталу амплітуду і фазу коливань, тоді як за великий проміжок часу і амплітуда, і фази змінюються.

Лампа розжарювання - штучне джерело світла, в якому світло випускає тіло розжарення. Подвійний скручений вольфрамовий дріт (або вугільна нитка) поміщена в скляний балон з відкаченим повітрям, нагрівається електричним струмом. Тіло розжарення випромінює електромагнітне теплове випромінювання відповідно до закону Планка. Функція Планка має максимум положення якого на шкалі довжин хвиль залежить від температури. Цей максимум зрушується з підвищенням температури в бік менших довжин хвиль. Для зниження затемнення лампу наповнюють інертним газом (температура нитки розжарювання  $\sim 2500$  К). При циклічному процесі випаровування атоми вольфраму реагують з бромідом, з'єднання осідає на нитку розжарювання і розпадається.

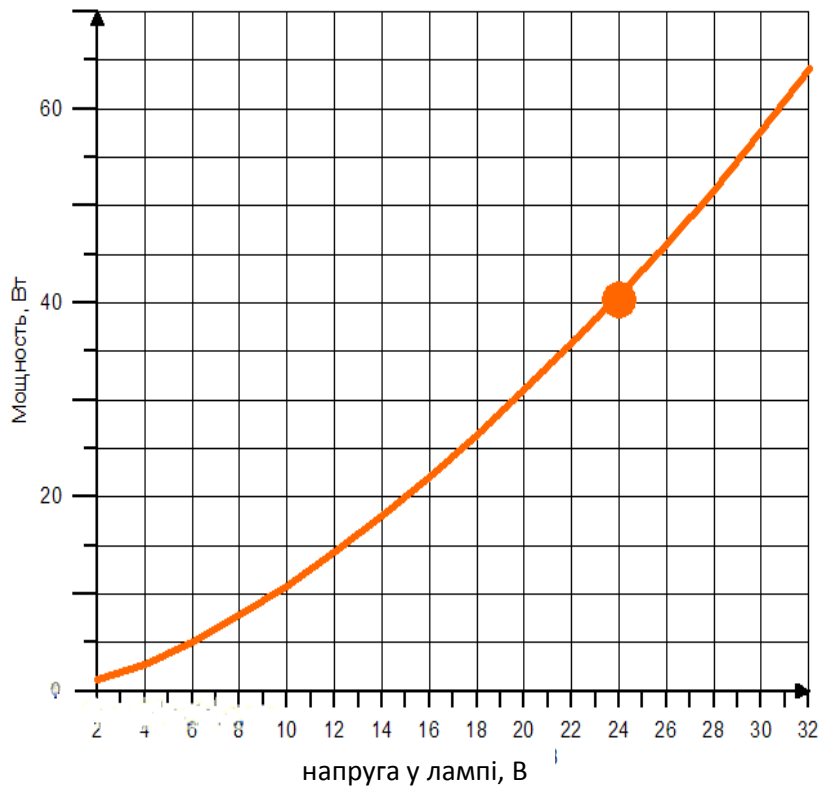


Рисунок 1.4 – Залежність потужності від напруги

Спектральна щільність потужності випромінювання (Функція Планка) має максимум, довжина хвилі якого на шкалі довжин хвиль залежить від температури. Положення максимуму в спектрі випромінювання зсувається з підвищенням температури в бік менших довжин хвиль. Для отримання видимого випромінювання необхідно, щоб температура випромінюючого тіла перевищувала  $570^{\circ}\text{C}$ .

Принцип дії ртутних газорозрядних ламп. За джерела світла, що виходить назовні і використовується людиною, газорозрядні лампи діляться на:

- люмінесцентні лампи, в яких в основному назовні виходить світло, яке покриває лампу шару люмінофора, що збуджується випромінюванням газового розряду;
- газосвітлові лампи, в яких назовні виходить саме світло від газового розряду;
- електродні світлові лампи, в яких використовується свічення електродів, порушених газовим розрядом.

Наприклад якщо до неону, інертного газу, який містить певну кількість ртуті, підвести високу напругу, то вільні електрони будуть прискорюватися до більш високої кінетичної енергії, здатної іонізувати газ. Наступна рекомбінація приведе до порушення атомів інертного газу. Спектральні характеристики таких джерел світла в значній мірі залежать від тиску, тобто різних процесів рекомбінації. Наприклад, лампи з низьким тиском газу, приблизно 100 Па, випромінюють переважно світло з довжиною хвилі 253,7 нм; лампи із середнім тиском газу, приблизно  $10^5$  Па, які вимагають більш високих електричних струмів. Потік випромінювання таких ламп в червоному, зеленому і синьому спектральному діапазоні відносно невеликий. Для отримання випромінювання в цих спектральних діапазонах краще використовувати ксенонові лампи високого тиску з колірною температурою близько 6000 К. Ці лампи не дають енергії спектрального випромінювання, що дається ртутними лампами в УФ області, але їх спектр у видимій області набагато більш згладжений, що краще підходить для спектрального аналізу з безперервним записом спектра.

### 1.2.3. Фотометричні величини

Фотометрія – вимірювання інтенсивності світла і його джерел. У фотометрії використовуються наступні величини:

- енергетичні які характеризують енергетичні параметри оптичного випромінювання безвідносно до його дії на приймачі випромінювання;
- світлові які характеризують фізіологічні дії світла і оцінюються по впливу на око.

При оптичних вимірах використовуються різні приймачі випромінювання (фотоелементи, фото помножувачі), які не володіють однаковою чутливістю до енергії різних довжин хвиль. Кожен приймач випромінювання характеризується своєю кривою чутливості до світла різних довжин хвиль [5]. Тому світлові вимірювання, будучи суб'єктивними, відрізняються від об'єктивних, енергетичних і для них вводяться світлові одиниці, використовувані тільки для видимого світла. Для визначення розмірних фотометричних величин застосовують або фотометри з

безпосереднім порівнянням невідомого і відомого потоків, або фотометри, попередньо градуйовані в одиницях виміру енергетичних або скорочених фотометричних величин. Джерело світла характеризується спектральним розподілом енергії, яке характеризується функцією розподілу  $\varphi(\lambda) = d\Phi / d\lambda$ , де  $d\Phi$  - потік енергії, що припадає на інтервал довжин хвиль від  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ . Чутливість середнього нормального людського ока до випромінювання різної довжини хвилі дається кривою відносної спектральної чутливості. По горизонтальній осі відкладена довжина хвилі  $\lambda$ , по вертикальній осі - відносна спектральна чутливість  $V(\lambda)$ .

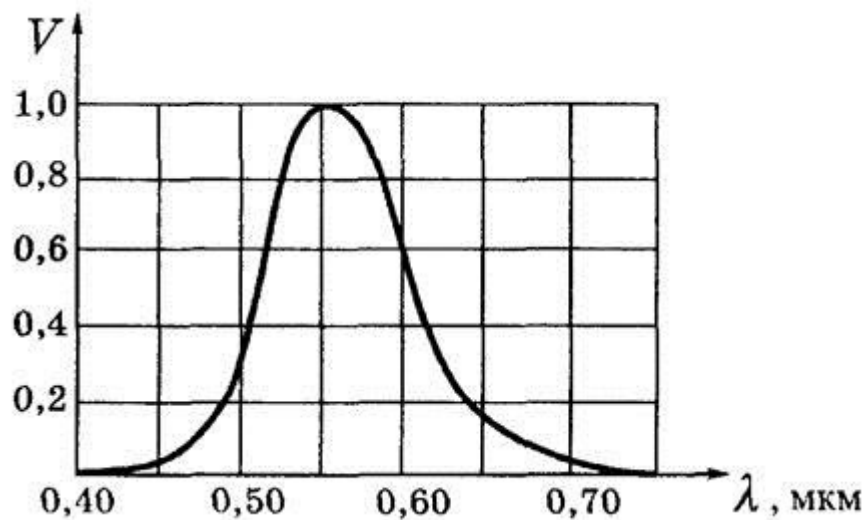


Рисунок 1.5 – спектральна чутливість

Для інтервалу довжин хвиль  $d\lambda$  сприймається оком світловий потік  $d\Phi$  визначається як добуток потоку енергії на відповідне значення функції  $V(\lambda)$ :

$$d\Phi = V(\lambda)d\Phi^* = V(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda \quad (1.3)$$

Енергетична яскравість  $L_e$  світиться поверхні в деякому напрямку дорівнює відношенню енергетичної сили світла  $dI_e$  елементарної площадки  $dS$

в даному напрямку до проекції площадки  $dS$  на площину, перпендикулярну цьому напрямку.

$$L_3 = \frac{dI_3}{dS_1} = \frac{dI_3}{dS \cos \alpha} \quad (1.4)$$

Зорове відчуття залежить не тільки від потужності випромінювання, але і від чутливості ока до випромінювання різних довжин хвиль. Ця фотометрична характеристика, яка враховує спектральну чутливість ока називається світловим потоком  $\Phi_\lambda$ .  $\Phi_\lambda = P_\lambda V_\lambda$ . Око чутливий лише у вузькому інтервалі довжин (0,38-0,77 мкм), причому навіть в цьому інтервалі чутливість ока неоднакова до різних довжинах хвиль. Найбільшою чутливістю очей володіє до довжини хвилі  $\lambda_{\max} = 0,55$  мкм, тобто до зеленого кольору. В ізотропних середовищах, де поширення світла не залежить від напрямку, показник заломлення є скалярна функція. В анізотропних середовищах він представляється у вигляді тензора. Залежність показника заломлення від довжини хвилі світла – оптична дисперсія яка призводить світло різних довжин хвиль, поширюється в середовищі з різною швидкістю, завдяки чому можливе розкладання монохроматичного світла (наприклад, білого) в спектр.

Фотометричні одиниці виміру залежать від спектральної чутливості ока людини. Зазвичай вони застосовуються при позначенні освітленості в навколишньому середовищі. Для коректного перетворення фотометричних одиниць виміру в фізичні необхідно використовувати криві чутливості очі. Їх максимуми розміщені в жовто-зеленому спектральному діапазоні. При монохроматичному світлі чутливість очі  $V_{rel}$  легко визначається, а по ній можна зробити коректний переклад фотометричній одиниці в фізичну:  $1 \text{ лк} = 1,61 \times 10^{-7} \times V_{rel} z < \text{Вт} / \text{см}^2$ ). Різний розподіл енергії по довжинах хвиль є причиною різного потоку випромінювання на різних довжинах хвиль.

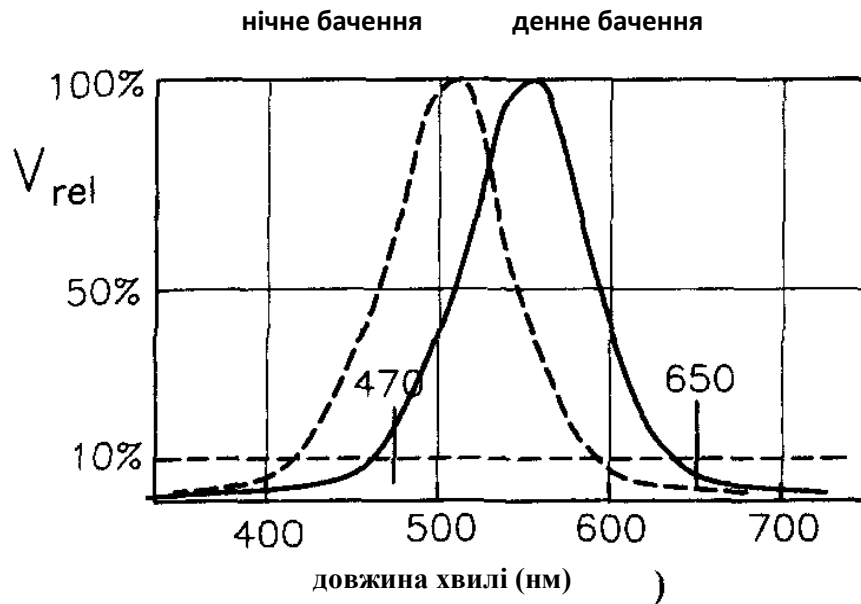
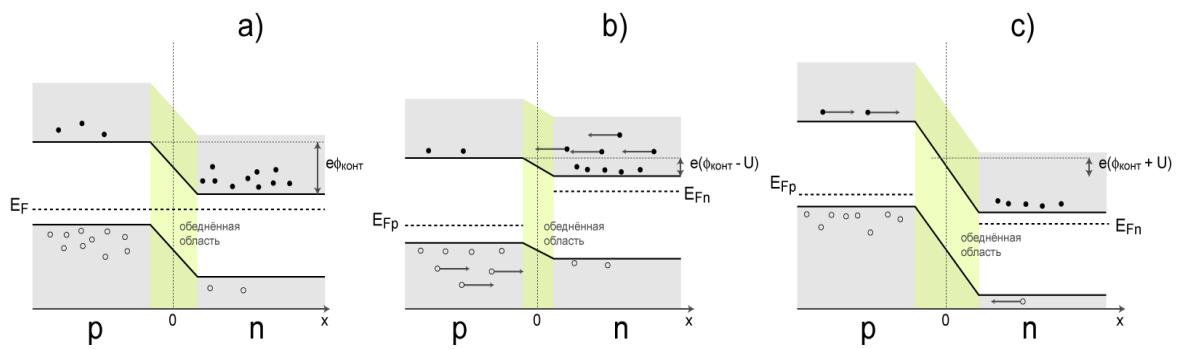


Рисунок 1.6 – Спектральна чутливість  $V_{rel}$  очі людини при денному баченні (фотопічне, тобто кольорове, бачення; колбочки<sup>1</sup>, суцільна лінія) і при нічному баченні (чорне і біле, бачення; палички<sup>1</sup>, пунктирна лінія)

При проходженні енергії випромінювання через різні середовища в загальному випадку має місце її ослаблення й зміна спектрального складу, що обумовляється властивостями цих середовищ, умовам товщини, у яких середовища перебувають [6]. Ослаблення випромінювання обумовлене енергетичними втратами на відбиття, поглинання й розсіювання потоку випромінювання.

У напівпровіднику р-типу, який виходить за допомогою акцепторної домішки, концентрація дірок набагато перевищує концентрацію електронів. р-п-перехід або електронно-дірковий перехід – область дотику двох напівпровідників з різними типами провідності – доречний і електронної. Електричні процеси в р-п-переходах є основою роботи напівпровідникових приладів з нелінійної вольт-амперної характеристикою.



а) Стан рівноваги; б) При доданому прямому напрузі; с) При доданому зворотній напрузі.

Рисунок 1.7 – Енергетична діаграма р-п-переходу

У напівпровіднику р-типу, який виходить за допомогою акцепторної домішки, концентрація дірок набагато перевищує концентрацію електронів. У напівпровіднику n-типу, який виходить за допомогою донорної домішки, концентрація електронів набагато перевищує концентрацію дірок [7]. Якщо між двома такими напівпровідниками встановити контакт, то виникне дифузний струм - основні носії заряду (електрони і дірки) хаотично перетікають з тієї області, де їх більше, в ту область, де їх менше, і рекомбінують один з одним.

#### 1.2.4 Спектральна характеристика

Під спектральною характеристикою мається на увазі зміна вольтової або порогової чутливості фотоприймача в залежності від довжини хвилі прийнятого монохроматичного випромінювання[20]. На спектральній характеристиці виділяють характерні точки, які відповідають максимальній монохроматичній чутливості фотоприймача ( $\lambda = \lambda_{\max}$ ) і чутливості, що дорівнює 0.1 від максимальної ( $\lambda_1$  – короткохвильова межа чутливості і  $\lambda_2$  – довгохвильовий кордон чутливості)  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  в цілому визначають спектральний діапазон чутливості фотоприймача. Для порівняння різних фотоприймачів

використовують відносні спектральні характеристики, які отримують шляхом визначення фоточутливості на певній довжині хвилі до  $\lambda_{\max}$ . При відомій величині забороненої зони напівпровідникового матеріалу, вираженої в електрон-вольтах, довгохвильовий кордон фоточутливості в мкм може бути визначена, як:

$$\lambda_{\text{кр.}} = 1.24/\Delta E \text{ [мкм]} \quad (1.5)$$

Спектральні характеристики фотоприймачів на основі одного і того ж напівпровідникового матеріалу можуть істотно відрізнятися як становищем так і безпосередньо спектральним діапазоном чутливості, який визначається хімічним і фазовим складом матеріалу чутливого шару.

Енергія електрона зв'язаного в атомі, а отже й енергія квантової системи в цілому не довільна. Вона може приймати лише певний дискретний ряд значень  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_n$ , названі рівнями енергії. Набір дозволених значень енергії називається енергетичним спектром атома. Перехід з нижніх рівнів на верхні, супроводжується поглинанням енергії, а з верхніх на нижні – випромінюванням [14]. Частота електромагнітної хвилі переходу.

$$\nu_{mn} = (E_m - E_n) / h \quad (1.6)$$

Де  $h$  – постійна Планка.

Переходи можуть бути й безвипромінювальними. При цьому енергія переходить в інші види – теплову або енергію коливань ґратки. Аналогічно, для переходу на верхні рівні може використовуватися тепла, хімічна й інші види енергії.

Система збудження випромінювань містить джерело випромінювання, що міняє свої спектральні характеристики при проходженні через досліджуваний об'єкт і освітлювальну систему. Вхідний коліматор призначений для

формування паралельного пучка променів, що необхідні для нормальної роботи диспергуючого пристрою [8].

Спектральні прилади розрізняються:

- по способу реєстрації спектра: візуальні (спектроскопи), фотографічні (спектрографи), Фотоелектричні (спектрофотометри, спектрометри);
- по способу спектрального розкладання випромінювання: призмові, дифракційні, інтерференційні;
- по робочій області спектра: вакуумні, ультрафіолетові, видимі, інфрачервоні.

По точності вимірювання розрізняють якісний, напівкількісний (погрішність до 50%) і кількісний (погрішність менш 5%) спектральний аналіз.

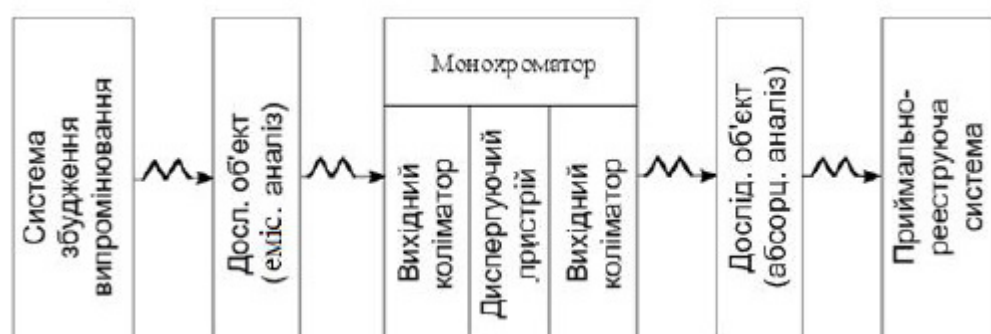


Рисунок 1.8 – Структурна схема спектрального приладу

Оптична система спектрального приладу складається з освітлювальної системи, монохроматори й приймально реєструючий системи [19]. До складу монохроматора входять вхідний і вихідний (камерний) коліматори й диспергуючий елемент (призма або дифракційна ґратка) (Рис.1.8).

Завдяки наявності диспергуючого елемента оптична система в цілому не є центрованою. Дисперговані монохроматичні пучки утворюють із віссю вихідного коліматора різні кути, й положення кожного зображення щілини на фокальній поверхні визначається довжиною хвилі випромінювання.

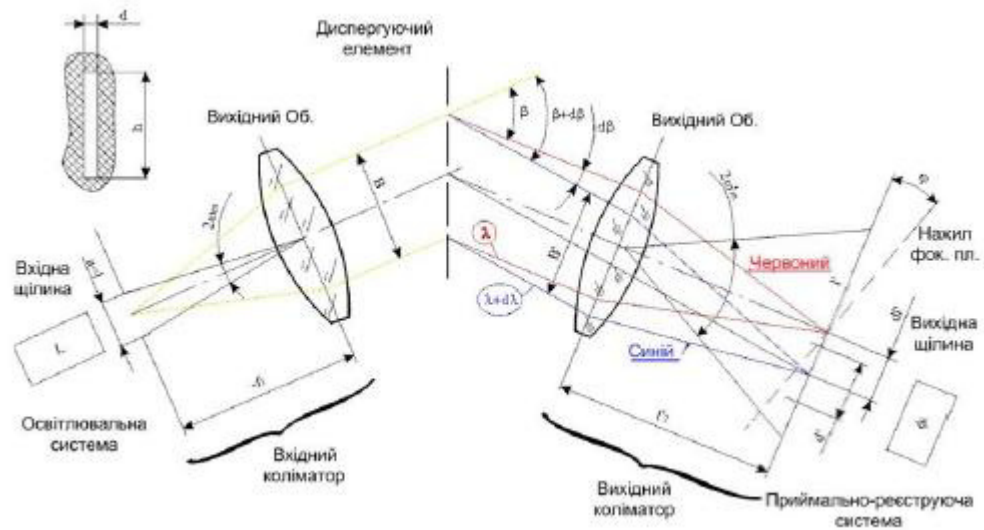


Рисунок 1.9 – Принципіальна схема ОС спектрального приладу (меридіональна площина)

Крім цього, лінійні збільшення оптичної системи спектрального приладу в напрямку дисперсії й у напрямку висоти щілини в загальному випадку різні [8]. Зазначені особливості оптичної системи спричиняють певну специфіку розрахунку й вибору оптичних елементів спектрального приладу.

### 1.3 Прилади для дослідження оптичного випромінювання

Серед різноманітних оптичних методів особливе місце займають спектральні методи вимірювання, за допомогою яких досліджуються: спектральна щільність випромінювання, спектральні оптичні характеристики тіл, спектральна й відносна чутливість приймачів випромінювання, спектральні характеристики оптичних систем, кольорні характеристики. Для виконання спектральних вимірювань застосовують спектральні прилади, які використовуються для розкладання електромагнітного випромінювання оптичного діапазону в спектр за довжиною хвиль і для вивчення цього спектра. Під вивченням спектрів розуміють визначення залежності енергії

випромінювання від довжини хвилі або частоти. Аналіз отриманого спектра можна виконувати різними методами залежно від використаного приймача випромінювання. За способом розподілу випромінювання у спектр спектральні прилади діляться на призму й дифракцію. Структурна схема спектрального приладу наведена на рис. 1.10

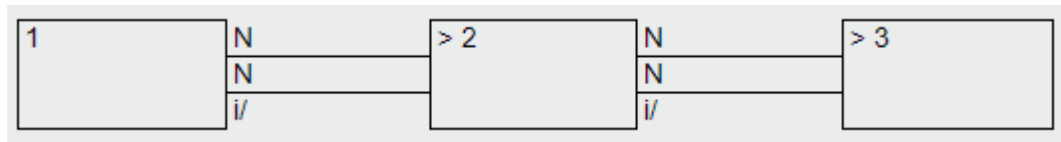


Рисунок 1.10 – Принципова схема спектрального приладу

Основними елементами спектрального приладу є вхідний коліматор який складається з вхідної щілини й лінзи. Вхідна щілина розташована на оптичній осі об'єктива коліматора в його фокальній площині, що створює на виході з лінзи паралельний пучок променів. Диспергуючий елемент служить для розкладання електромагнітного випромінювання оптичної області спектра у спектр за довжинами хвиль, який використовуються спектральні призми й дифракційні решітки [9]. Вихідний коліматор складається з камерного об'єктива і пристрою, який розташовано у фокальній площині цієї оптичної системи. Досліджуване джерело освітлює вхідну щілину коліматора. Випромінювання, що пройшло вхідну щілину надходить, на об'єктив коліматора, після чого паралельним пучком променів направляється на диспергуючий елемент, де відбувається розкладання випромінювання у спектр. Місце цих зображень у фокальній площині камерного об'єктива і складає спектр випромінювання. Якщо в цій площині розмістити фотопластину, то вона зафіксує спектр випромінювання, яке пройшло крізь прилад.

На рисунках наведено дві основні схеми спектрофотометрів, що вимірюють спектральний апертурний коефіцієнт відображення даного об'єкта щодо робочого стандарту з відомої спектральної характеристикою:

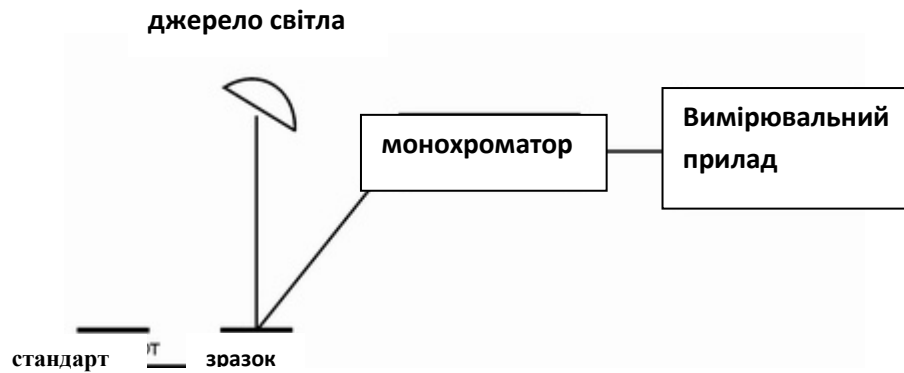


Рисунок 1.11– Схема спектрометра що вимірює апертурний коефіцієнт

Вимірюваний зразок висвітлюється білим світлом. Монохроматор розташований в вихідному потоці. Для поліпшення характеристик і точності вимірювань в сучасних спектрофотометрах також використовуються подвійні монохроматори.

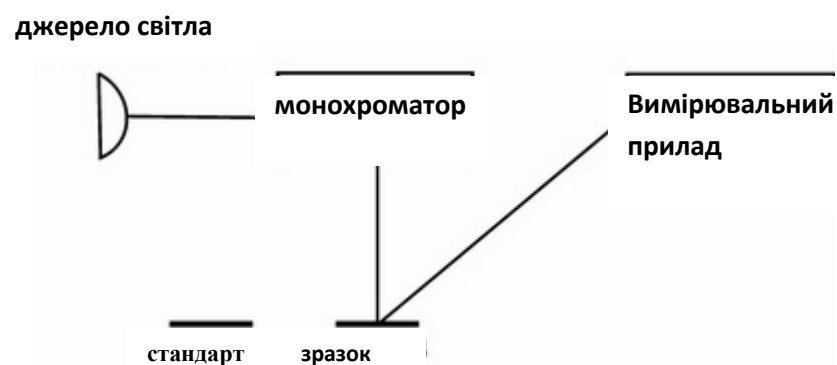


Рисунок 1.12 – Спектральна характеристика являє собою залежність фоточутливості від довжини світлової хвилі або спектру випромінювання при постійних напрузі приладу і світловому потоці.

Спектральна роздільна здатність – безрозмірна величина, що дорівнює відношенню довжини хвилі випромінювання до спектрального дозволу на цій довжині хвиль. Спектр світлового випромінювання у видимому діапазоні довжин хвиль від 380 до 730 нм.

Оптичні прилади називаються спектральними, в яких здійснюється розкладання електромагнітного випромінювання оптичного діапазону на монохроматичні складові [4]. Такі прилади використовуються для якісного і кількісного дослідження спектрального складу світла, випромінюваного, що поглинається, що відбивається або розсіюється речовиною. Спектральні прилади застосовуються також для отримання випромінювання заданого спектрального складу.

Характеристики спектральних приладів, що визначають їх властивості та можливості, є робочий спектральний діапазон, світлосила, відносний отвір, дисперсія, роздільна здатність і рівень розсіяного світла. Спектрографи призначені для одночасної реєстрації щодо широкої області спектра. На відміну від монохроматорів, в фокальній площині направляючого об'єктива замість вихідної щілини встановлюється багатоелементний приймач (фото діодна лінійка, ПЗС – лінійка, ПЗС – матриця та ін.), що дозволяє реєструвати оптичне випромінювання в межах певного поля [7]. Спектрографи використовуються переважно в ультрафіолетовій, видимій та ближній інфрачервоній областях спектра, що обумовлено наявними в даний час багатоелементними приймачами випромінювання (190-2600нм). Прилад люксметр ТКА – Люкс є найбільш затребуваним і має метрологічні характеристики. Він призначений для вимірювання освітленості у видимій області спектра 380-760 нм, створений стандартних джерел оптичного випромінювання. Цей прилад по точності відтворення і передачі розмірів одиниць сили світла і освітленості забезпечує метрику робочих засобів вимірювань і відрізняється часовою стабільністю і достовірністю. У оптичну спектроскопію входять всі аналітичні методи, засновані на взаємодії світла і матерії.

Суть спектрографічних вимірювань розкладається в спектр призмою або дифракційною ґраткою. За допомогою діафрагми щілини і спектра виділяється вузький монохроматичний пучок, який подається на приймач. При вимірюванні спектра поглинання чи пропускання перед приймачем розміщують зразок, спектр якого вимірюють. Спектр відбивання одержують порівнюючи характеристики монохроматичного випромінювання, відбитого від поверхні зразка і еталону. У оптичну спектроскопію входять всі аналітичні методи, засновані на взаємодії світла і матерії.

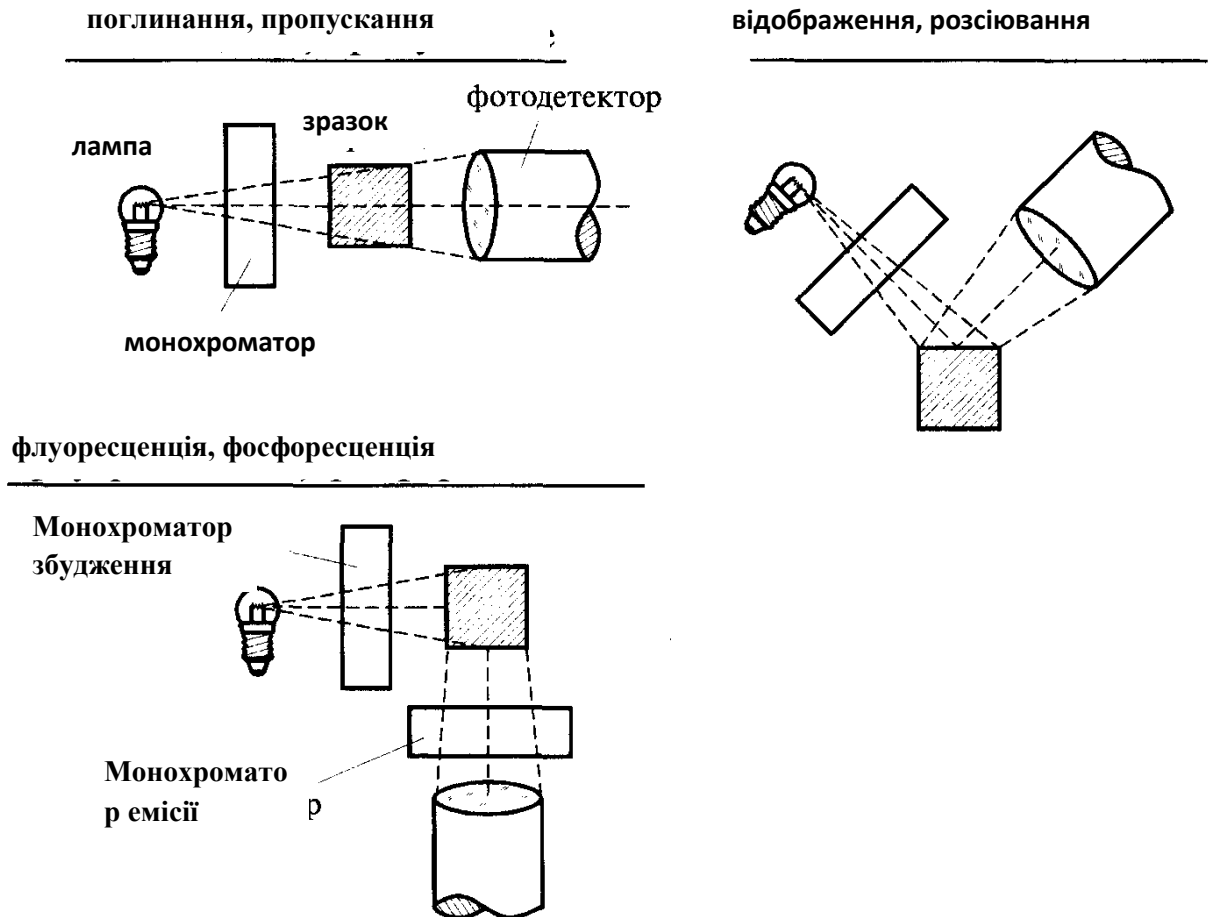


Рисунок 1.13 – Три принципові оптичні схеми, які використовуються під час вимірювань спектрів пропускання, відбиття та люмінесценції

Інтенсивність випромінювання визначається як частка відділення енергії на час. Потік випромінювання розглядається у вигляді просторового і спектрального розподілу. У цьому випадку щільність потоку випромінювання визначається як:

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A_2} (\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}) \quad (1.7)$$

де  $A_2$ - площа, на яку падає випромінювання.

Один і той же потік випромінювання дасть велику інтенсивність випромінювання  $E_e$ , якщо він обмежений меншим просторовим обсягом.

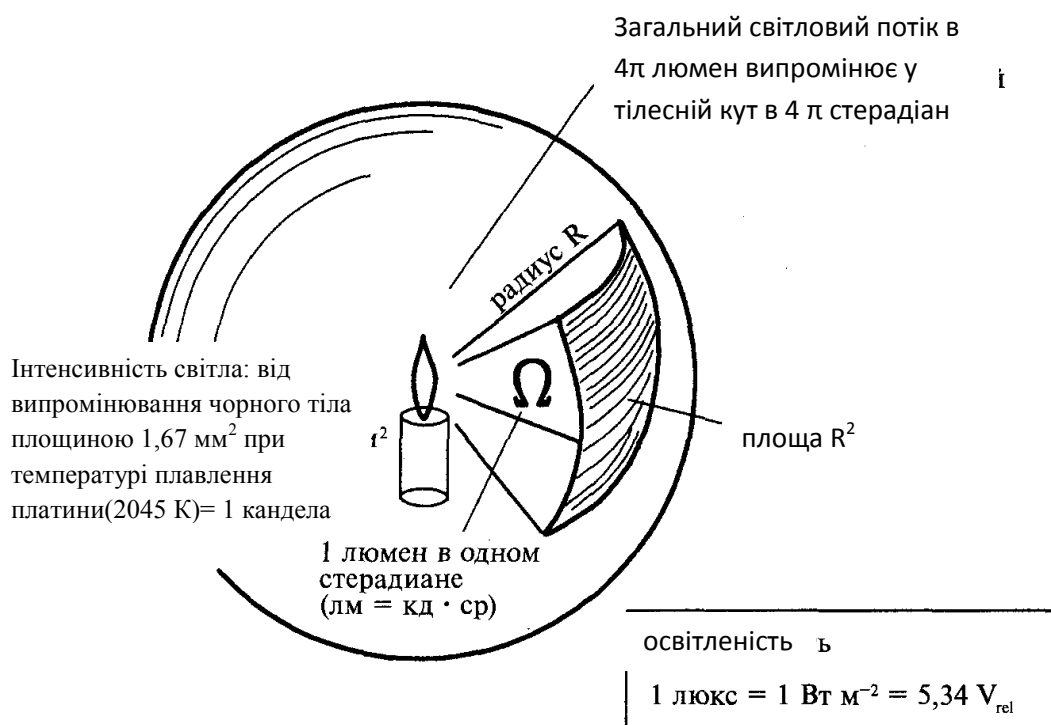


Рисунок 1.14 – Подання фотометричних світлових одиниць за допомогою сфери з радіусом R. Сила світла (кандела, кд) утворює світловий потік (люмен), який характеризується щільністю потоку світла всередині сфери

Фізичні одиниці вимірювання світла при використанні в оптичній спектроскопії називаються радіометричними, а одиниці вимірювання світла, що характеризують освітленість і пов'язані з фізіологічним розпізнаванням людським оком, називаються фотометричними.

#### 1.4 Спектрофотометр і його принцип роботи

Оптико-електронний прилад призначений для визначення спектральної характеристики (щільності поглинання світлового потоку). Виконує аналітичне сканування спектрального діапазону довжин хвилі і відокремлює монохроматичний світловий потік (довжину хвилі) від загальної спектральної щільності світлового потоку.

Спектрофотометри можуть працювати в різних діапазонах довжин хвиль – від ультрафіолетового до інфрачервоного. Залежно від цього прилади мають різне призначення. Типи спектрометрів: рентгені-флуоресцентні; іскровий; оптико-емісійний; лазерний; інфрачервоний; індуктивно-зв'язаної плазми, атомно-абсорбційний. Найпростіші спектрофотометри спеціально призначені для режиму сканування і побудови кривої абсорбції (поглинання). Такий прилад здатний досліджувати процеси інтерференції, які можуть приводити до помилкових результатів в дослідженнях. Основна відмінність – це відмінність другої кювети з порівнянням. Єдиний зразок опромінюється двома різними видами хвиль, після чого вже і визначається різниця випромінювань. Тип спектрофотометра з фотодіодними ґратками – це прилад оснащений спеціальною матрицею або ґратками. Їх принцип дії відрізняється. Спочатку світло проходить через зразок, а потім потрапляє на решітку дифракції, яка розкладає світло і проектує його на матрицю або фотодіод. Він і містить спеціальні датчики, які перетворюють енергію світла в імпульс.

Різні діапазони хвиль дають різні відгуки практично миттєво, на відміну від традиційних способів спектрофотометрії. Також можна про принцип заснований на реєстрації інтерференційних смуг стоячої світлової

хвилі шляхом проектування зображення системи інтерференційних смуг на фото чутливій лінійки. При цьому метод обробки сигналу відрізняється від традиційної Фур'є спектроскопії лише тим, що перетворення піддаються сигнали не тимчасової, а просторової частоти.

Прилад із зарядним зв'язком (лінійка ПЗС) – це мікросхема на підкладці якої сформовані комірки, які перетворюють енергію світла в електричні заряди. Кожна комірка має три електроди. При подачі напруги зберігання на другий електрод, створюється електричне поле і створюється електронно-дірковий перехід [10]. При цьому всі основні носії відтісняються в глиб напівпровідника. Близько провідника створюється потенційна яма. При висвітленні комірки виникають електронно-діркові пари. При цьому електрони притягуються до потенційної ями і утворюють зарядовий пакет, величина якого залежить від інтенсивності світлового променя і часу засвічення. В наступний момент часу на третій електрод подається напруга зчитування, яка за величиною більше напруги зберігання. У цього електрода створюється велика потенційна яма і бар'єр між другим і третім електродами зникає. Зарядовий пакет перетікає в більш глибоку яму, потім напруга зчитування зменшують до напруги зберігання, а напруга з електрода 2 знімається. Таким чином зарядовий пакет переміщується в доль всієї лінійки на вихід.

### 1.5 Прилади із зарядовим зв'язком КМОП

Для перетворення оптичного випромінювання в електричні сигнали застосовуються прилади із зарядним зв'язком, такі як ПЗС – лінійки і ПЗС – матриці. Назва ПЗС (прилад із зарядним зв'язком) визначається здатністю приладу переносити заряд з однієї зони ПЗС в сусідню зону. Між близько розташованими МОП конденсаторами можливий обмін зарядами – зарядовий зв'язок. Маніпулюючи зсувами, що прикладаються до таких конденсаторів, можна накопичувати заряди, переміщати їх, розділяти, об'єднувати, тобто здійснювати аналогову і цифрову обробку інформації на дискретних, але

пов'язаних між собою об'єктах [9]. Датчики зображення можуть бути лінійними або матричними. Сучасні матричні датчики зображення на ПЗС класифікуються за способом перенесення інформації. Основними є такі три типи: рядковий перенос; кадрове перенесення; рядково-кадрове перенесення.

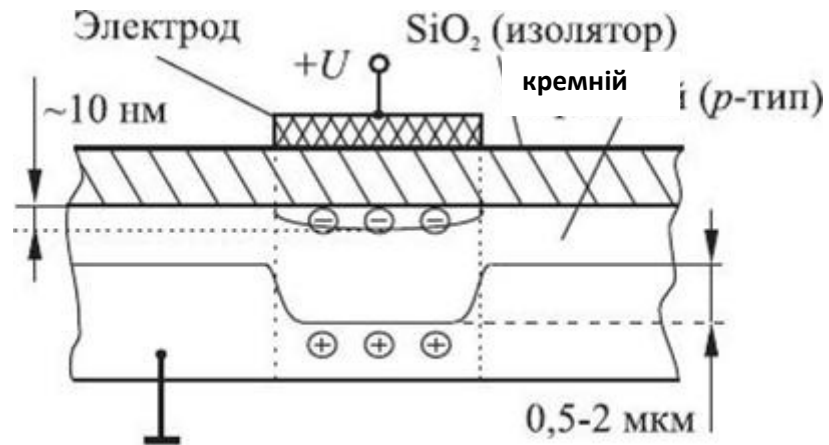


Рисунок 1.15 – Структура МОП – ємності

Аналого-цифрове перетворення – це перетворення числа, інформації, представлена у вигляді цифрового коду, в еквівалентний аналоговий сигнал. АЦП встановлюються в ланцюгах зворотних зв'язків цифрових систем управління для перетворення аналогових сигналів зворотних зв'язків в коди, які сприймаються цифровою частиною системи. АЦП виконують кілька функцій, таких як: тимчасова дискретизація, квантування за рівнем, кодування. Узагальнена структурна схема АЦП представлена на рис 1.16.

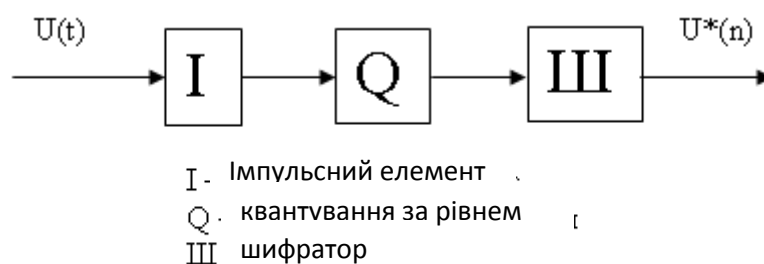


Рис. 3.1

Рисунок 1.16 – Структурна схема АЦП

На приладах із зарядним зв'язком (ПЗС) складаються з окремих комірок, в яких під дією падаючого на них світла утворюється електричний заряд. Після експонування заряд кожну комірку перетворюється в електричну напругу. Це перетворення відбувається в спеціальному вузлі датчика, який називається вихідним пристроєм. Першим зчитується заряд з комірок, розташованої поруч з вихідним пристроєм. Після зчитування цей заряд руйнується, а заряди всіх наступних комірок зсуваються на одну клітинку у сторону вихідного пристрою. Так відбувається до тих пір, поки не буде прочитаний заряд з найдалшої комірки. Після цього датчик знову готовий до накопичення зарядів. Лінійка ПЗС – це датчик в якому всі комірки збудовані в одну лінію, в кінці якої знаходиться вихідний пристрій [13]. На рисунку 1.17 схематично зображено нерівномірно освітлена лінійка ПЗС.



Рисунок 1.17 – Принцип пристрою лінійки ПЗС

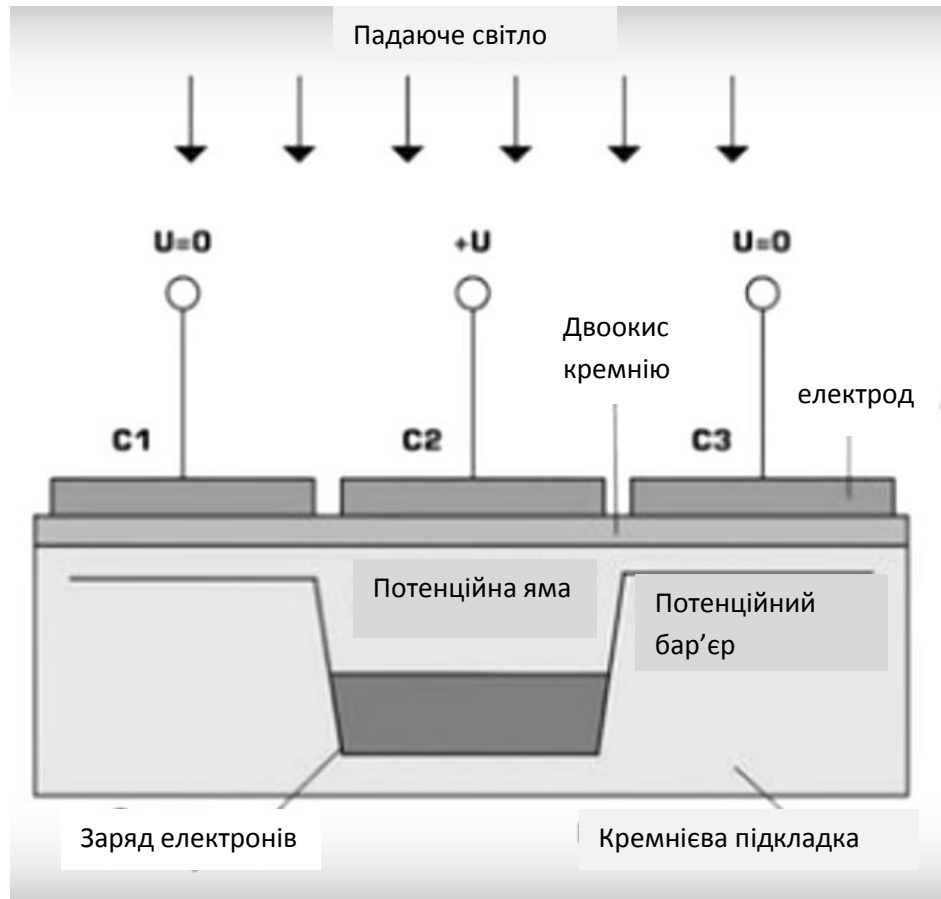


Рисунок 1.18 – Принципове пристрій ПЗС – матриці. Символами С1, С2 і С3 позначені МОП – конденсатори (метал-оксид-напівпровідник).

Якщо до якогось електроду докласти позитивну напругу  $U$ , то в МДП структурі виникає електричне поле, під дією якого основні носії (дірки) дуже швидко (за одиниці піко-секунд) йдуть від поверхні напівпровідника. В результаті у поверхні утворюється збіднений шар, товщина якого становить частку або одиницю мікрометра. Таким чином, у поверхні виникає потенційна яма для електронів. Протягом заданого інтервалу часу кожен піксель поступово заповнюється електронами пропорційно. Після закінчення цього часу електричні заряди, накопичені кожним пікселем, по черзі передаються на вихід приладу і вимірюються [17]. Протягом заданого інтервалу часу кожен піксель поступово заповнюється електронами пропорційно кількості потрапив в нього

світла. Після закінчення цього часу електричні заряди, накопичені кожним пікселем, по черзі передаються на вихід приладу і вимірюються. Практично точно так же працює і ПЗС – матриця.

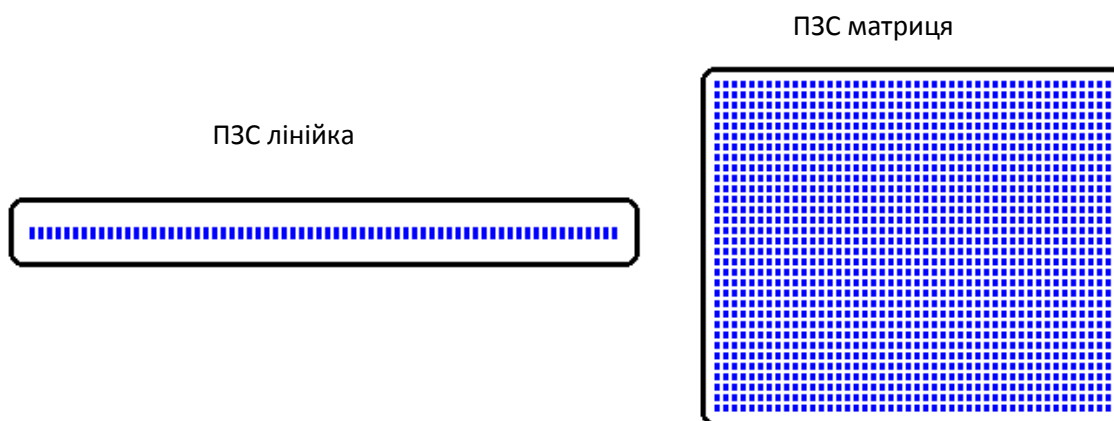


Рисунок 1.19 – Розташування світло прийомних елементів (прямокутники синього кольору) в ПЗС – лінійці і ПЗС – матриці.

Одним з основних параметрів матриці є квантова ефективність. Ця назва відображає ефективність перетворення поглинутих фотонів в фотоелектрони поняття світлочутливість. Оскільки енергія світлових квантів залежить від їх кольору (довжини хвилі), неможливо визначити скільки електронів знаходиться в пікселі матриці при поглинання ним наприклад потоку зі ста різнорідних фотонів. Нижня межа виявлення об'єкта на ПЗС залежить від рівня шумів, як випадкових, так і вироблених самої матрицею. Існує безліч внутрішніх джерел шумів: в основному це термоелектрони, вироблені самою матрицею, і шуми зчитування, що виникають при переміщенні зарядів.

## 1.6 Сучасні спектрофотометри

Точність калібрування спектрометра має велике значення для багатьох методів оптичної характеристики, таких як спектроскопія та інтерферометрія. Для калібрування спектрометра використовується калібрувальна лампа, які

забезпечують чітко окреслені лінії на відомій довжині хвилі, і вони присвоюються індексам пікселів детектора. Однак для малих спектральних діапазонів, де доступна лише невелика кількість калібрувальних ліній, калібрування стає неточним. Калібрувальна лампа висвітлює спектрометр, і вимірюються положення, тобто піксельні показники ( $p$ ) калібрувальних ліній відомих довжин хвиль ( $\lambda$ ). Калібрувальні лампи (наприклад, Hg / Ar лампи) забезпечують емісійні лінії на заданій довжині хвилі. Як правило, є області широкої довжини хвилі без піків, що призводить до обмеженої точності калібрування. Крім того, примірник вищого поліноміального ступеня ( $N > 3$ ) вимагає певної кількості калібрувальних ліній. У спектрометрах з малим спектральним діапазоном калібрувальні лінії можуть бути обмеженими. Для мініатюрних спектрометрів, які мають сильно нелінійні світлові дисперсії звичайний спосіб є менш надійним.

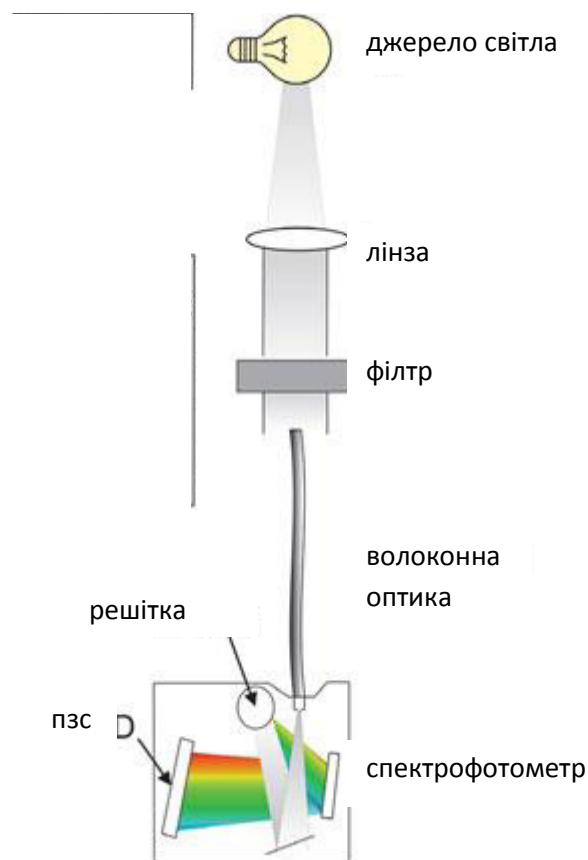


Рисунок 1.20 – Налаштування експерименту для інтерферометрії, калібрування за допомогою ртутної лампи.

Мініатюрний спектрометр USB 2000+ від Ocean Optics був використаний для виявлення спектрів [21]. Щоб дослідити продуктивність алгоритму, точність методу калібрування порівнювалася з точністю звичайного калібрування. Для цього були використані всі виявлені опорні лінії і до даних був пристосований поліном третього ступеня.

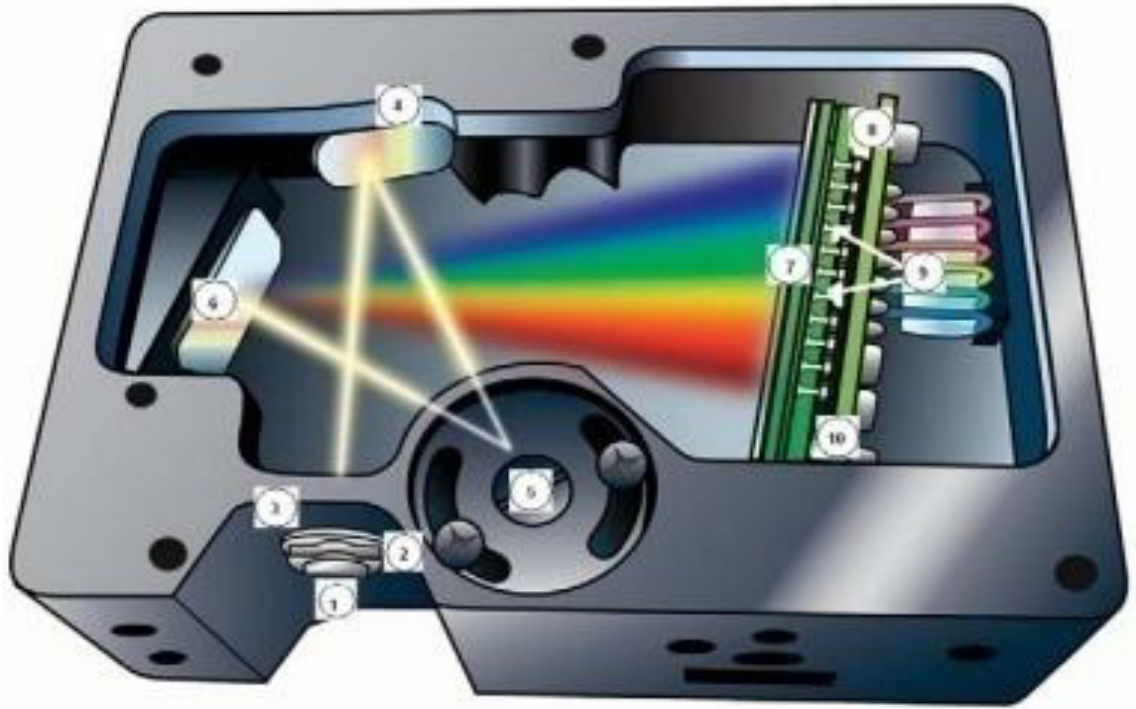
Таблиця 1.1 – Паспортні дані

Спектрометр USB 2000+ Ocean Optics	
ПЗС-детектор	2048 пікселів
Розмір пікселів	14 x 200 мкм
Ємність пікселя	62 500 електронів
Спектральний діапазон	200–1100 нм
Розміри	89.1 мм x 63.3 мм x 34.4 мм
Час інтегрування	10мкс–60с

Експериментальна точність калібрування була визначена шляхом розрахунку різниці між довжинами хвиль калібрувальних кривих і точними точками, для ліній ртуті та аргону. Перевага методу калібрування полягає в здатності калібрувати сильно нелінійні мініатюрні спектрометри для спектральних діапазонів, в яких є тільки кілька еталонних ліній. Додаткові калібрувальні піки від FRF забезпечують більш високу відповідність поліноміального порядку, що призводить до більш високої точності калібрування. Цей результат був отриманий при використанні значної кількості

калібрувальних ліній для звичайного калібрування. У діапазонах, де є менша кількість ліній, різниця стане більш глибокої.

Так само можна сказати про калібрування спектрометра USB4000 виробництва компанії Ocean Optics [14]. В результаті виконання калібрування спектрометра отримана можливість вимірювання абсолютних значень спектральної щільності в діапазоні 250-890 нм. Спектрометр USB4000 відноситься до спектральних приладів нового типу та відрізняється від попередніх поколінь малими габаритами (89.1 x 63.3 x 34.4 мм) і масою відсутністю рухомих частин. Використовується 16-розрядний аналого-цифровий перетворювач, чотири режими синхронізації, коректування темного сигналу при зміні температури і універсальний 22-контактний роз'єм з вісьмома програмованими лініями введення-виведення. У спектрометрі встановлений лінійний ПЗС - детектор Toshiba TCD1304AP. До приладів на додаток цього типу пропонується широкий вибір спектроскопічних приладів, які підключається до спектрометра за допомогою стандартних оптичних роз'ємів. Все це обумовлює гнучкість і широту використання, дозволяючи створювати різноманітні спеціалізовані системи для застосувань, пов'язаних з вимірюванням спектрів поглинання, пропускання, відбиття або випускання.



1) Роз'єм SMA905; 2) фіксована вхідна щілина; 3) оптичний фільтр; 4) колімуюче дзеркало; 5) дифракційна решітка; 6) фіксоване дзеркало; 7) збираюча лінза детектора L4; 8) детектор; 9) змінний фільтр вищих порядків OFLV; 10) вікно детектора UV4

Рисунок 1.21 – Спектрометр Ocean Optics USB4000

Спектрофотометр LR1 (рис.1.22) має внутрішню пам'ять SRAM, яка здатна зберігати 64 зібрані спектри. Збір даних складається з двох етапів: експонування читання і передача у вбудовану пам'ять SRAM, котра займає 10 мс.



Рисунок 1.22 – Спектрофотометр ASEQ-instruments LR-1

Доступні три режими тригера: 1) Дані виходять після отримання команди від комп'ютера без зовнішнього тригера. Події збору даних уточнюються. Події збору даних розділені зазначеним рівнем кількістю порожніх сканувань. Пусте сканування ідентично реальному скануванню збору даних, за винятком того, що дані не зберігається в пам'яті пристрою. 2) Дані виходять після зовнішнього запуску (необов'язково в LR1). Цей режим запуску може використовуватися для виявлення тимчасового відгуку системи на будь-яку подію, синхронізоване з зовнішнім тригером. 3) Кожен спектр збирається після зовнішнього запуску.

Таблиця 1.2 – Паспортні дані спектрофотометра LR1

Спектрофотометр ASEQ-instruments LR-1	
Розміри	102 мм × 84 мм × 59 мм
Детектор	Toshiba TCD1304DG
Діапазон детектора	200-1100 нм
Пікселі	3648
Розмір пікселя	8 x 200 мкм
Глибина піксельної ями	100 000 електронів
Спектральний діапазон	300 - 1000 нм
Час зчитування CCD	14 мс

Спектрофотометр LR1 розпізнається операційною системою Windows як стандартний пристрій HID. Тому і немає необхідності встановлювати будь-які спеціальні драйвери для використання спектрометра. Операційна система розпізнає пристрій після підключення спектрометра до USB-порту. Після того, як запусимо програму «CheckTr.exe» вона зчитує інформацію про конфігурацію, включаючи інформацію про калібрування від спектрометра флеш пам'яті.

Компактні ПЗС-спектрометри Czerny-Turner на волоконній основі Thorlabs доступні в трьох моделях. Дві моделі, які забезпечують детектування в діапазоні 350 - 700 нм або 500 - 1000 нм. Третя модель забезпечує широкий спектральний діапазон 200 - 1000 нм. Завдяки розмірам, приблизно рівним розміру портативного жорсткого диска (122 мм x 79 мм x 29,5 мм), продуктивність цих ПЗС – спектрометрів ідеальна для систем або освітніх програм на основі оптоволокна.

Таблиця 1.3 – Паспортні данні спектрометра на волоконній основі  
Thorlabs

ПЗС-спектрометр Czerny-Turner	
Довжин хвиль	200 – 1000 нм
Розміри	122 мм x 79 мм x 29,5 мм
USB-з'єднання	до 200 сканувань в секунду
Матриця CCD	3648-піксельна
Перетворювач.	16-бітний (аналого-цифровий)

Thorlabs рекомендує проводити калібрування цих спектрометрів кожні 24 місяці. Коректори косинуса Thorlabs призначені для сполучення з з'єднувальним волокном SMA або вхідним портом нашого ПЗС – спектрометра. Вони оснащені дифузорами на вхідних апертурах і дозволяють використовувати спектрометри для вимірювань у вільному просторі. Thorlabs пропонує лінійні оптоволоконні пучки оптимізовані для використання з спектрометрами. Мають лінійну волоконну решітку, яка відповідає геометрії щілини спектрометра. Це забезпечує високі рівні сигналу в спектрометрі.

## 2 КАЛІБРУВАННЯ КОМПАКТНОГО СПЕКТРОМЕТРА

### 2.1 Постановка завдання

Для визначення коефіцієнтів калібрування довжин хвиль, потрібні:

– спектрометр USB 4000, який має: 16-бітовий аналого-цифровий перетворювач, чотири варіанти роботи тригера, коригування темного сигналу під час температурних змін і універсальний роз'єм з 22 контактами з вісьмома програмованими користувачем лініями введення-виведення; діапазон довжин хвиль 200-1100 нм

– ртутно-аргонове джерело випромінювання HG-1, яке має спектральний діапазон 253-1700 нм; вихідний сигнал лінії ртуті і аргону в газовому розряді низького тиску; оптичний роз'єм SMA 905. Довжина хвилі сильних емісійних ліній ртуті 253.65 - 365.02 нм. Довжина хвилі сильних емісійних ліній аргону 696.54 - 751.47 нм.

За допомогою джерела HG-1 можна проводити калібрування довжини хвилі спектрометра використовуючи редактор електронних таблиць Microsoft Excel.

### 2.2 Методика калібрування по довжині хвилі.

Калібрування визначають, як «набір операцій, які за певних умов дозволяють встановити взаємозв'язок між значеннями, що видаються вимірювальним приладом або вимірювальною системою, або значеннями, отриманими для матеріальної міри, і відповідними відомими значеннями для еталона. Відповідно питання полягає в тому, наскільки добре узгоджуються результати вимірів, отримані за допомогою спектрометра, зі значеннями з сертифіката на атестований стандартний зразок. Зрозуміло, що це відповідність

може бути виражено просто у вигляді абсолютної різниці або у вигляді процентної різниці.

Ключовим елементів класичного спектрального приладу є диспергируючий елемент, здійснює поділ в просторі за напрямками в залежності від довжини хвилі падаюче на нього випромінювання. Основні використовувані на практиці, дисперсійні елементи – призми різних типів і дифракційні решітки. У моделі USB4000 використовується 16-бітовий аналого-цифровий перетворювач, чотири варіанти роботи тригера, коригування темного сигналу під час температурних змін і універсальний роз'єм з 22 контактами з вісьмома програмованими користувачем лініями введення-виведення. USB4000 може бути підключений до комп'ютера з операційною системою Linux, Mac або Windows. Модульний USB 4000 працює в діапазоні довжин хвиль від 200 до 1100 нм і може бути укомплектований різними оптичними елементами Ocean Optics, джерелами світла і оптичними датчиками для створення спеціалізованих систем для тисяч різних застосувань, пов'язаних з вимірюванням.

Для калібрування по довжині хвилі використовуємо спектрометр USB 4000 від компанії Ocean Optics. Кожен спектрометр проходить калібрування на підприємстві, перед тим як дійде до замовника. Однак при зміні умов навколишнього середовища та с пройденим часом, можливе невелике відхилення довжини хвилі. Довжина хвилі пов'язана з розміром пікселя.

$$\lambda p = I + C_1 p + C_2 p^2 + C_3 p^3 \quad (2.1)$$

де

$\lambda$  – довжина хвилі для пікселя  $p$ ;

$I$  – довжина хвилі для пікселя 0;

$C_1$  – перший коефіцієнт (нм/піксель);

$C_2$  – другий коефіцієнт (нм/піксель<sup>2</sup>);

$C^3$  – третій коефіцієнт (нм/піксель<sup>3</sup>);

Для калібрування спектрометра Ocean Optics по довжині хвилі потрібно:

- джерело світла, яке може відтворювати спектральні лінії (HG-1 ртутно-аргонова лампа.);
- спектрометр Ocean Optics USB 4000
- волоконно-оптичний кабель (оптимальним буде кабель з діаметром волокна 50 мкм);
- програма для роботи з електронними таблицями (Excel).

Для калібрування ідеально підходить випромінювання HG-1 ртутно-аргонова лампа. Ртутно-аргоновий джерело випромінювання HG-1 призначений для калібрування довжини хвилі спектрофотометричних систем, що працюють в УФ, видимому і ближньому ІЧ діапазонах. HG-1 відтворює спектральні лінії першого порядку ртуті і аргону в діапазоні 253-922 нм і лінії аргону другого порядку в діапазоні до 1700 нм. Довжини хвиль легко ідентифікованих ліній ртуті і аргону наведені на корпусі джерела HG-1



Рисунок 2.1 – Зовнішній вид джерела випромінювання HG-1

Для калібрування спектрометра по довжинах хвиль зробимо наступне:

- Переведемо SpectraSuite в режим Scope і отримаємо спектр випромінювання каліброваного джерела. Встановимо такий час інтегрування або частоту АЦП,

щоб вершини декількох спектральних піків не виходили за верхню межу шкали.

– Перемістимо курсор в область одного з піків і встановимо його в точку з максимальною сигналом.

– Створимо таблицю 2.1 в якій запишемо дані: справжні довжини хвилі спектральних ліній, номери пікселів, номери пікселів зведені в квадрат і номери пікселів зведені в куб.

Таблиця 2.1 – Калібрування спектрометра по довжинам хвиль

Справжня довжина хвилі	№ пікселя	№ пікселя <sup>2</sup>	№ пікселя <sup>3</sup>	Розрив довжини хвилі	Різниця
253.65	175	30625	5359375	253.56	0.09
296.73	296	87616	25934336	296.72	0.01
302.15	312	97344	30371328	302.40	-0.25
313.16	342	116964	40001688	313.02	0.13
334.15	402	161604	64964808	334.19	-0.05
365.02	490	240100	117649000	365.05	-0.04
696.54	1491	2223081	3314613771	696.70	-0.15
706.72	1523	2319529	3532642667	706.62	0.10
727.29	1590	2528100	4019679000	727.24	0.06
738.40	1627	2647129	4306878883	738.53	-0.13
751.47	1669	2785561	4649101309	751.27	0.19

Далі вибираємо відому довжину хвилі в якості залежної змінної (Y). У незалежних змінних (X) вибираємо номери пікселів, номери пікселів зведені в квадрат і номери пікселів зведені в куб. Після виконання регресії отримаємо результат.

Таблиця 2.2 – Регресійна статистика

Множинний R	0.999999831
R - квадрат	0.999999663
Нормований R - квадрат	0.999999607
Стандартна помилка	0.125540214
Спостереження	17

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти

Змінні (Y), (X)	Коефіцієнти	Стандартна помилка
Y - перетин	190.473993	0.369047536
Змінні X1	0.36263983	0.001684745
Змінні X2	-1.174416E-0.5	8.35279E-07
Змінні X3	-2.523787E-09	2.656608E-10

Збереження нових калібрувальних коефіцієнтів (USB підключення). Калібрувальні коефіцієнти, унікальні для кожного окремого спектрометра, зберігаються в його вбудованій пам'яті (EEPROM). Можна перезаписати старі калібрувальні коефіцієнти, що знаходяться в (EEPROM), через порт USB за допомогою спеціальної програмою.

Підсумкова спектральна залежність абсолютної чутливості спектрометра USB4000, отримана таким чином для випадку відкритого волоконно-оптичного кабелю, представлена на рис. 2.2.

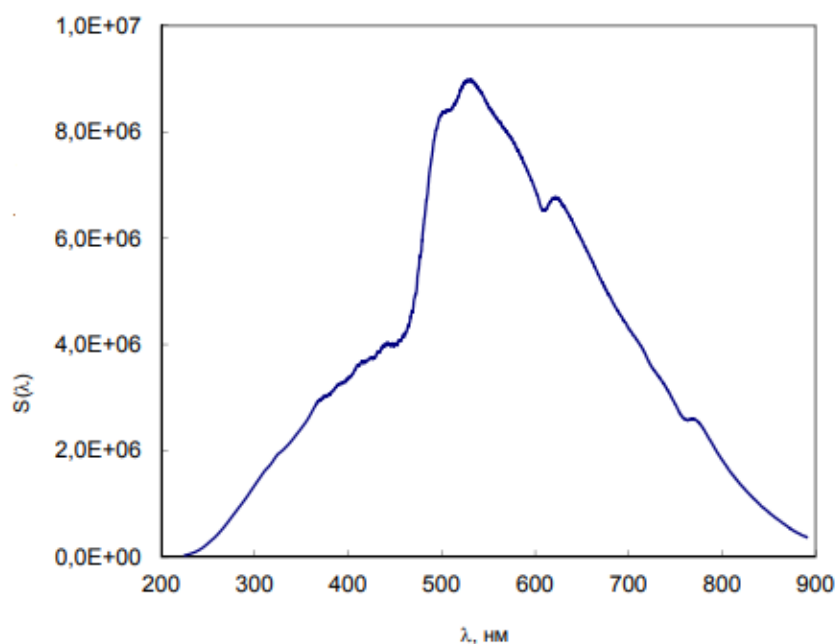


Рисунок 2.2 – Спектральна залежність абсолютної чутливості спектрометра USB4000, з'єданого з відкритим волоконно-оптичним кабелем

Виходячи з даних рис. 2.2 можна стверджувати, що калібрування виконана для всього робочого діапазону спектра наявного в нашому розпорядженні спектрометра. Відзначимо також, що спостерігаються на кривій рис. 2.1 локальні екстремуми і перегини не є проявом похибок вимірювань, а відображають дійсні властивості приладу. Таким чином, в роботі розвинена і застосована методика абсолютної радіометричної калібрування ПЗС-спектрометра USB4000, що дозволяє підвищити точність і достовірність отриманих результатів з одночасним розширенням спектрального діапазону, для якого вона здійснюється. Методика заснована на використанні декількох взаємно доповнюють один одного паспортизованих джерел випромінювання з різним спектральним складом. В результаті застосування розробленої методики визначена спектральна залежність абсолютної чутливості спектрометра USB4000 для всього його робочого діапазону спектра і тим самим отримана можливість виконання з його допомогою абсолютних вимірювань.

Виходячи з отриманих даних спектрометра за розрахунком коефіцієнта калібрування по довжині хвилі можна зробити висновок що ці дані можна використовувати і для інших пристроїв таких як: спектрометр Ocean Optics USB 2000+ та спектрометр Ocean Optics HR400

## ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі проаналізовані спектральні характеристики, оптичні випромінювання, фотометричні величини, спектрофотометр та його принцип роботи. З'ясовано переваги та недоліки зазначених типів спектрофотометрів.

Зроблено висновок щодо перетворення оптичного випромінювання в електричні сигнали такі як ПЗС – лінійки, прилади із зарядним зв'язком. Також, та підсумкову спектральну залежність абсолютної чутливості спектрометра.

Виконано порівняння спектрофотометрів таких типів як: ASEQ-instruments LR-1; Ocean Optics USB 2000+; Ocean Optics USB4000; Czerny-Turner на волоконній основі Thorlabs. Пропонується широкий вибір спектроскопічних приладів, які підключається до спектрометра за допомогою стандартних оптичних роз'ємів. У цих спектрометрів однаковий спектральний діапазон, однак різні розміри, мінімальний час інтегрування який складає USB2000+ - 1 мс, USB4000 - 3,8 мс, LR1 - 14 мс. Різниця за ціною відносно невелика, але доступнішим буде Ocean Optics USB2000 +.

Для калібрування спектрометра було використано ртутно-аргонове джерело випромінювання HG-1. Довжина хвилі джерела випромінювання ртуті має значення 253.65 – 365.015 нм, довжина хвилі аргона 696.54 – 751.47 нм. Ці діапазони підходять до вимірювання спектрометра Ocean Optics USB4000 (200-1100нм)

Була створена програма для розрахунку калібрувальних коефіцієнтів по довжині хвилі ртутно-аргонового джерела випромінювання HG-1, за допомогою спектрометра Ocean Optics USB4000 використовуючи редактор електронних таблиць Microsoft Excel. Результати коефіцієнтів змінних (Y), (X)  $C = 0.36263983$ ;  $C^2 = -1.174416E-0.5$ ;  $C^3 = -2.523787E-09$ .

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Малініна А.О., Малінін О.М., Шуаїбов О.К. Формування поля випромінювання в резонаторах лазера: навчальний посібник. Ужгород: Вид-во УжНУ «Говерла», 2019. 124 с.
2. Малинко В.Н., Сусь Б.А. Курс фізики, т. 2, ч. 2, КВВИУС
3. Черняев Ю. С. Оптическое излучение Физическая энциклопедия Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. —Т. 3. — С. 459.
4. Оптичні і оптико-електронні системи: Учеб. Посібник МГУПИ / Амурский В.Б., Гарипов В.К, Панина Н.В., Слепцов В.В. Москва 2006. - с.
5. Сапожников Р. А., Теоретична фотометрія, 2 изд., Л., 1967
6. Скоков І.В. Оптичні спектральні прилади М.: Машинобудування 1983. 296 с.
7. В.В. Пасинків, Л.К. Чиркин, А.Д. Напівпровідникові прилади. СПб .: Лань, 2003.
8. Соколов И.В. Оптичні спектральні прилади М.: Машинобудування, 1984. 240 с.
9. НДІ «Електрон». Датчик оптичного випромінювання Р22. Технічний паспорт. Санкт-Петербург, 2004.
10. М. Хоувза, Д. Моргана. Приборы с зарядовой связью. — М.: Энерго издат, 1981. — 372 с.
11. Савельев И.В. Курс общей физики, т. 2. - М.: Наука, 1978.
12. Кондиленко И. И., Коротков П. А., Хижняк А. И. Физика лазеров — Киев: Вища школа, 1984. — 232 с.
13. Ю.Р. Носов, В.А. Шилин. Основы физики приборов с зарядовой связью. — М.: Наука, 1986. — 318 с.

14. Catalog.Dunedin, FL, USA. Ocean Options, Inc. 2007. 194 p.
15. Ю.Р. Носов, В.А. Шилин. Основы физики приборов с зарядовой связью – М.: Наука, 1986. — 318 с.
16. Иоффе Д.С. Датчики зображення на приборах зарядовим зв'язком.
17. Фролова Т.И. Перспективы развития высокоэффективных источников света: от теории к реальным осветительным системам / Т.И. Фролова, Г.И. Чурюмов // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Том 13, № 2. – С. 135-143. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prre\\_2014\\_13\\_2\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prre_2014_13_2_7)
18. Мачехин Ю.П., Фролова Т.И., Грищенко Ю.А. Дослідження спектру випромінювання безелектродної сірчаної лампи. Світлотехніка та електроенергетика, 2009, № 3 (19). - С.46-49.
19. Ю.П. Мачехин, Т.И. Фролова, Ю.Л. Старчевский, Ю.А. Грищенко. Спектральні і колірні характеристики безелектродних СВЧ-ламп. Прикладна радіоелектроніка, 2009, Том 8, № 1, с. 75-79.
20. Мачехин Ю.П., Фролова Т.И., Шунькова Ю.А. Облік впливу апаратної функції спектроаналізатора при розрахунку колірних характеристик спектра випромінювання сірчаних СВЧ-ламп. Світлотехніка та електроенергетика, 2010, № 2(22), С. 21-26.
21. Perret, E.; Balmer, T.D. et al. Appl. Spectrosc. 2010, 64, 1139.