

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра мікроелектронних інформаційних систем

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота**

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження та розробка пристрою  
для реєстрації слабких оптичних сигналів

Виконав: студент II курсу, групи МН-18-1мд  
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна  
техніка

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікроелектронні інформаційні  
системи

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

О.О. Кузнецов

(ініціали та прізвище)

Керівник Професор, професор, д.т.н. Левинзон Д.І.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Ген. директор ТОВ „Омега, мід” Шевченко Т.В.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2020

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ**

Факультет енергетики електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра мікроелектронних інформаційних систем  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»  
(код і назва)  
Освітня програма Мікроелектронні інформаційні системи  
(код і назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

“ 8 ” 01 2020 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)**

Кузнецову Олександр Олександровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Дослідження та розробка пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

керівник роботи Левінзон Д.І., д.т.н., професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від “ 10 ” 09 2019 року № 1536-С

2 Строк подання студентом роботи 31 грудня 2019

3 Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Прилади реєстрації оптичних сигналів

2. Дослідження та розробка пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

3. Техніко-економічне обґрунтування розробки пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів, 4. Охорона праці і техногенна безпека

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

ФЕП для реєстрації 14 випромінювання.

Електрична схема мільйонна імпульсів  
 Оптична система реєстратора

### 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	Левінзон Д.І. професор	<i>[Signature]</i> 20.09.19	<i>[Signature]</i> 02.09.19
II	Левінзон Д.І. професор	<i>[Signature]</i> 20.09.19	<i>[Signature]</i> 02.09.19
III	Левінзон Д.І. професор	<i>[Signature]</i> 20.09.19	<i>[Signature]</i> 02.09.19
IV	Левінзон Д.І. професор	<i>[Signature]</i> 20.09.19	<i>[Signature]</i> 01.09.19

7 Дата видачі завдання 02 вересня 2019

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз приладів реєстрації оптичних сигналів	17.09.2019	
2	Дослідження та розробка схем пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів	15.10.2019	
3	Аналіз техніко-економічного обґрунтування розробки пристрою	04.11.2019	
4	Розробка заходів з охорони праці.	26.11.2019	
5	Написання пояснювальної записки	20.12.19	
6	Попередній захист.	26.12.19	

Студент *[Signature]* Куценко В.О.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) *[Signature]* Левінзон Д.І.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *[Signature]* Верховий П.П.  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

## Реферат

Дипломна робота містить 82 сторінки, 29 рисунків, 18 таблиць, 41 джерело літератури.

Об'єкт дослідження – оптичні системи передачі інформації у УФ, ІЧ та видимому діапазонах світлового випромінювання.

Мета роботи – дослідження та розробка пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів.

Задачі роботи – провести аналіз сучасних способів реєстрації оптичних сигналів та обрати для найбільш оптимальний для використання у якості прототипу; розробити структурну схему пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів; розробити електричні схеми основних апаратних блоків пристрою; провести моделювання роботи електричних схем пристрою.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмного забезпечення Proteus.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено та досліджено структурну схему двох каналного реєстратора слабких оптичних сигналів, проведено дослідження по вдосконаленню каналу реєстрації ІЧ випромінювання, проведено моделювання роботи пристрою.

Результати впровадженнь – модель електронного приладу пройшла випробування на кафедрі МЕІС.

Прогнозні пропозиції – рекомендується для проведення лабораторних досліджень та практичних занять.

**ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЛІЧИЛЬНИК СВІТЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ, РЕДАКТОР PROTEUS.**

Дипломну роботу виконано на кафедрі мікроелектронних інформаційних систем Інженерного інституту ЗНУ, з 02.09.2019 р. по 26.12.2019 р.

## Зміст

	Стор.
Вступ .....	6
1. Прилади реєстрації оптичних сигналів .....	8
1.2 Реєстрація сигналів у інфрачервоному (ІЧ) діапазоні .....	13
1.3 Фотометри і радіометри оптичного випромінювання.....	16
1.3.1 Прецизійна фотометрична головка для вимірювання ІЧ випромінювання.....	16
1.3.2 Ультрафіолетовий радіометр для вимірювання сигналів УФ випромінювання.....	18
2. Дослідження та розробка пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів.....	23
2.1 Структурна схема пристрою пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів.....	23
2.2 Реєстрація УФ випромінювання.....	26
2.2.1 Використання напівпровідників ZnO у якості фотоелектричного перетворювача.....	26
2.2.2 Електрична схема каналу реєстрації УФ випромінювання.....	30
2.2.3 Моделювання роботи стабілізатора напруги в середовищі Proteus...	35
2.3 Реєстрація ІЧ випромінювання.....	25
2.3.1 Електрична схема блоку живлення для фотоелектронного приймача ІЧ діапазону.....	37
2.3.2 Моделювання роботи блоку живлення для фотоелектронного приймача ІЧ випромінювання.....	38
2.4 Електрична схема лічильника імпульсів пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів.....	40
2.5 Інтерфейс з'єднання каналу реєстрації слабких оптичних сигналів із персональним комп'ютером (ПК).....	44

	5
2.6 Розрахунок шумових ефектів системи реєстрації слабких оптичних	45
3 Техніко-економічне обґрунтування розробки пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів .....	55
3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення пристрою .....	55
3.2 Розрахунок витрат на виробництво пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів .....	59
4 Охорона праці та техногенна безпека .....	61
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів .....	61
4.2 Заходи з поліпшення умов праці .....	62
4.3 Виробнича санітарія .....	65
4.4 Електробезпека .....	66
4.5 Пожежна безпека. Техногенна безпека .....	68
4.6 Розрахунок захисного заземлення .....	70
Висновки та рекомендації.....	73
Перелік посилань.....	75
Додаток А .....	79

## Вступ

Впродовж декількох останніх десятиліть спостерігається неухильний зростаючий інтерес до освоєння оптичного діапазону хвиль. В результаті виникають актуальні завдання проектування і створення пристроїв прийому і обробки оптичних сигналів.

Основною частиною приймача оптичних сигналів є перетворювач оптичного випромінювання в електричний сигнал. В даний час існує безліч перетворювачів, принцип дії яких заснований на зовнішньому або внутрішньому фотоефекті. Характеристики приймача оптичних сигналів визначаються параметрами самого перетворювача і схемою обробки сигналу з його виходу.

У більшості приймачів світла сигнал на виході з'являється лише при реєстрації групи фотонів, що обмежує чутливість і наводить до втрати інформації про статистичну структуру світла. Для реєстрації слабких світлових потоків ( $10^{-9}$ ,  $10^{-10}$  Вт) найбільш чутливими і точними є одноелектронні реєстратори [1,2].

Історія розробки одноелектронних реєстраторів для оптичної області спектру починається з 30-х років минулого століття, коли для реєстрації окремих квантів в ультрафіолетовій області спектру застосовувалися газорозрядні лічильники Гейгера-Мюллера [3]. Хоча досвід і виявився вдалим, поширення цього методу на видиму частину спектру не принесло очікуваних результатів (сурм'яно-цезієвий фотокатод руйнувався в режимі самостійного розряду).

Успішнішим було використання для цих цілей фотоелектронних помножувачів (ФЕП), охолодження яких рідким азотом дозволяло різко понизити інтенсивний темновий струм (при температурі  $-183^{\circ}\text{C}$  темновий струм складав 12-45 імпульсів в хвилину і був обумовлений емісією з перших динодів) [3].

У останні десятиліття бурхливий розвиток мікроелектроніки привів до появи нових перетворювачів оптичних сигналів в електричних (лавинні фотодіоди, фототранзистори, прилади із зарядовим зв'язком і ін.), які по деяким параметрам можуть конкурувати з вакуумними ФЕП в режимі реєстрації слабких світлових сигналів.

В даний час існує два основні методи реєстрації слабких світлових сигналів [4]: метод рахунку фотонів і метод виміру струму. Всі останні методи є їх доповненнями і окремими випадками, що дозволяють домогтися підвищення тих або інших параметрів.

Метод рахунку фотонів (МРФ) полягає в наступному. Вхідний сигнал викликає на виході ФЕП потік одноелектронних імпульсів, які після посилення до необхідного рівня відбираються і формуються амплітудним дискримінатором [4]. Отримані стандартні імпульси підсумовуються в лічильнику. У такій схемі при порівняно невеликій інтенсивності сигналу на виході можливе отримання з високою точністю інформації про кількість електронів, що вилетіли з фотокатода (фотоелектронів). При порівняно великій інтенсивності оптичного сигналу із-за накладення відгуків ФЕП виникає помилка, що полягає в прийнятті рішення про реєстрацію меншої кількості фотоелектронів чим було насправді.

Метод виміру струму (МВС) заснований на використанні інтегруючого ланцюга, приєднаного до виходу ФЕП. Вимір струму дає інформацію про інтенсивність сигналу, що приймається. Недоліком цього способу є низька точність реєстрації надслабких потоків в порівнянні з МРФ.

Отже, актуальними є роботи по дослідженню та розробці електронних пристроїв для реєстрації слабких оптичних сигналів.



## 1 Прилади реєстрації оптичних сигналів

### 1.1 Реєстрація сигналів в ультрафіолетовому (УФ) діапазоні

Оптико-електричні перетворювачі (ОЕП) в УФ-області випромінення також поділяються на теплові та фотонні.

Сучасні УФ ОЕП можна класифікувати відповідно до схеми з рисунку 1.1 [5-7].

Фотографічні середовища мають великі переваги у вигляді їхньої власності реєстрації та запам'ятовування оптичного зображення. Проте, суттєво нижча чутливість порівняно з фотоелектричними УФ ОЕП, вузький динамічний діапазон, нелінійність характеристики перетворення, чутливість фотоемульсії за надто широкого діапазону енергій сильно обмежує можливості і сфери застосування ОЕП цього типу в сучасних УФ вимірювальних і детектувальних пристроях.

Навпаки, фотоелектричні УФ ОЕП значно чутливіші до сприйняття УФ-випромінення, мають високу стабільність і лінійність характеристики перетворення. Розроблені фотовольтаїчні детекторні матриці та фотоемісійні лінійки із малоплощинних ОЕП поєднують високу чутливість і радіометричну стабільність ФЕП із високою розподільною здатністю елементів зображення. В фотоемісійних УФ ОЕП максимальної чутливості в діапазоні довжин хвиль від 400 до 235 нм удалося досягти під час використання таких матеріалів фотокатодів, як SbKCs і CsTe, відповідно.

У таблиці 1.1 наведено та порівняно переваги та недоліки фотоемісійних і фотоелектричних УФ ОЕП [6].

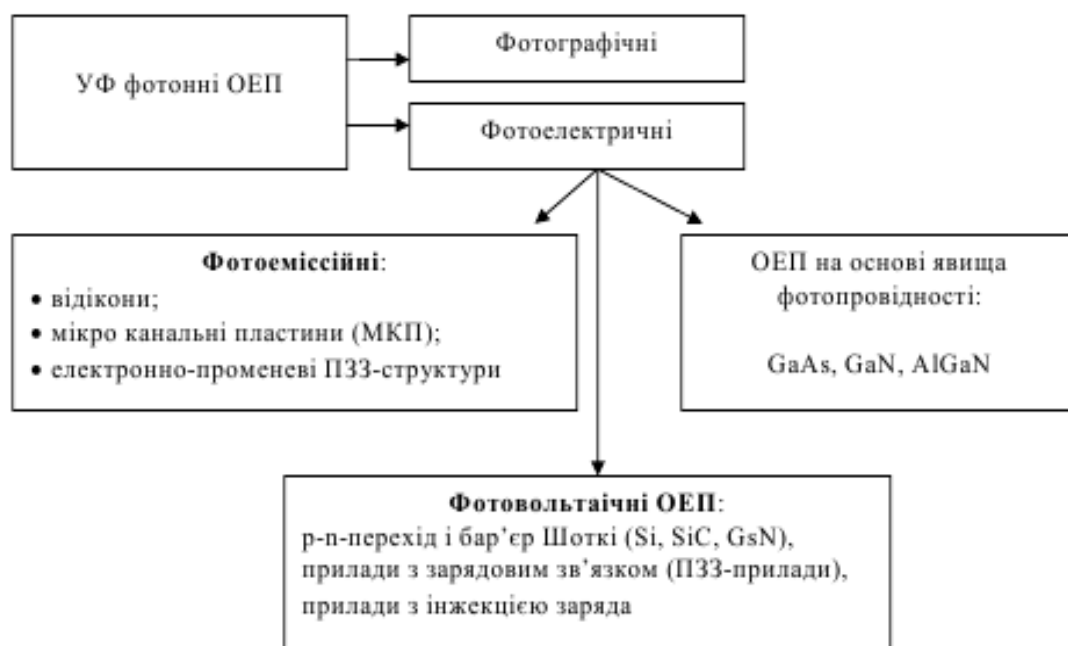


Рисунок 1.1 – Класифікація фотонних оптико-електричних перетворювачів для УФ-області спектра

Таблиця 1.1 – Зіставлення фотоемісійних і фотоелектричних УФ ОЕП

Тип	Переваги	Недоліки
Фотоемісійні	Простота експлуатації, висока чутливість, захищеність від засвічування сонячним випроміненням	Низький ефективний квантовий вихід, висока селективність, чутливість до забруднення поверхні
Фотоелектричні	Широкий діапазон спектральної чутливості, чудова лінійність, високий ефективний квантовий вихід, широкий динамічний діапазон, можливість виготовлення широкоформатних матриць	Ефекти старіння

Як відомо, УФ ОЕП працюють в трьох основних режимах:

фотопровідності (фоторезистори), фотодіода з р - п - переходом і фотодіодом з бар'єром Шоткі. До будь-якого із ОЕП пред'являються вимоги:

- 1) нечутливості до світлових потоків у видимій області спектра (такі ОЕП в літературі називають „сонячносліпими”);
- 2) високого ефективного квантового виходу;
- 3) широкого динамічного діапазону;
- 4) слабкої фонові чутливості;
- 5) експлуатації не за криогенних температур, тобто в режимі високотемпературної електроніки [8].

Отже, споживачу необхідний УФ ОЕП, що поєднує компактність і низьку робочу напругу кремнієвого ФД зі здатністю ФЕП „відсікати” видиме випромінення. Тому увагу розробників було зосереджено на пошуках і дослідженнях матеріалів і хімічних сполук для створення твердотільних (напівпровідників) УФ ОЕП. Їхні зусилля увінчалися успіхом, була розроблено низьку матеріалів, найважливіші властивості яких наведено та порівняно в таблиці 1.2 [7].

Дані таблиці 1.2 свідчать про те, що найбільш перспективними матеріалами удосконалення існуючих і розробки нових напівпровідникових УФ ОЕП є AlGaN і алмаз [6,7].

Для еталонних вимірювань актуальний пошук твердотільної ОЕП із розраховуваною (бажано неселективною) спектральною залежністю  $K_{\text{пер}}$ . На жаль, більшість поширених в УФ-області спектра кремнієвих ФД мають спектральну залежність  $K_{\text{пер}}$ , що швидко змінюється через велику кількість іонізаційних рекомбінаційних ефектів [6,8].

Альтернативою кремнієвих ФД можуть служити ФД з широкою забороненою зоною на основі, наприклад, GaAsP і GaP, а також спеціально розроблені ОЕП із SiC. Ці ФД є „сонячносліпими”; дослідження їхньої довгочасової та короткочасової стабільностей свідчать про необхідність подальшого вдосконалення як самих матеріалів, так і створюваних на їхній основі ФД для еталонних ПВП в області повітряного УФ [7].

Таблиця 1.2 - Зіставлення найважливіших властивостей напівпровідникових матеріалів для високотемпературної електроніки

Параметр, властивості	Si	GaAs	GaP	3C-SiC (6H-SiC)	GaN	Алмаз
Параметри решітки, А	a=5,430	a=5,6533		a=4,36 (a=3,08) (c=15,12)	a=3,189 c=5,185	
Ширина забороненої зони при 300 К, eV	1,1	1,4	2,3	2,2 (2,9)	3,39	5,5
Коефіцієнт теплового розширення, $10^{-6}K^{-1}$	3,59	6,0		4,2 (2,68)	5,59 3,17	
Максимальна робоча температура, К	600	760	1250	1200 (1580)		1400
Фізична стабільність	Добра	Достатня	Достатня	Чудова	Добра	Дуже добра
Рухливість електронів при 300 К, $cm^2/V \cdot s$	1400	8500	350	1000 (600)	900	2200
Рухливість дірок при 300 К, $cm^2/V \cdot s$	600	400	100	40	150	1600
Напруга пробою, $10^6 V/cm$	0,3	0,4	-	4	5	10
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/см	1,5	0,5	0,8	5	1,3	20
Дрейфова швидкість електронного насичення, $10^7 cm/s$	1	2	-	2	2,7	2
Статична діелектрична стала	11,8	12,8	11,1	9,7	9	55

Прагнення створити „сонячносліпі” УФ ОЕП, які не старіють під впливом інтенсивних потоків УФ-випромінення з густиною в кілька Ватт на квадратний сантиметр, призвело до створення перетворювачів на основі укритих металом діелектриків. На відміну від ФД Шоткі, металічне покриття має створити акумулюючий шар на межі з діелектриком.

У якості останніх використано чистий синтетичний сапфір ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) і кристалічний оксид магнію ( $\text{MgO}$ ). Саме ці матеріали виявилися термічно та фотохімічно стабільними у широких діапазонах змін температури і (УФ – С) опроміненості. За різниці потенціалів в декілька сотень вольт, прикладених до діелектрика, фотоструми дорівнюють рівними 1 і 10 мА за довжин хвиль 250 і 340 нм, відповідно. Крім вирішення завдань вимірювань і детектування оптичних сигналів у повітряному піддіпазоні УФ-випромінення (УФ-С), постала необхідність засвоєння вакуумного ультрафіолету – ВУФ, який займає спектральну область із довжинами хвиль від 200 до 0,2 нм, що відповідає діапазону енергій фотонів від 6 еВ до 6 кеВ. Випромінення ВУФ сильно поглинається повітрям, тому всі вимірювання доводиться виконувати у вакуумі.

Основною проблемою для радіометрії ВУФ залишається розробка надійних, недорогих, простих в експлуатації ПВП, оскільки добре опрацьовані технологічні процеси одержання напівпровідникових структур для виготовлення ОВП у видимій області й навіть у діапазоні повітряного УФ складно, а часом неможливо, розповсюдити на ВУФ [5].

Розроблені нові тонкоплівочні на скляній підкладці ОФП на основі (а – Si:H) і (а – SiC:H), які мають високий Кпер при довжинах хвиль менше 110 нм і надійно відсікають випромінення видимої частини спектра. За кімнатної температури ефективний квантовий вихід дорівнює 52; 1 і 0,1 %, за довжин хвиль – 584; 400 і 650 нм, відповідно. Перехідна імпульсна характеристика цих ОВП під час дії випромінення імпульсного УФ аргонного лазера мали відповідно наступні значення параметрів: час зростання – 500 нс і ширина на напіввисоті від максимуму інтенсивності – 6 мкс [7].

## 1.2 Реєстрація сигналів у інфрачервоному (ІЧ) діапазоні

ІЧ-техніка з кожним роком стає все більш популярною в найрізноманітніших сферах людської діяльності. Це спонукало розробників створити радіометричну апаратуру переважно для спектрального діапазону від 1 до 20 мкм.

ІЧ-прилади широко застосовуються у приладах нічного бачення, тепловізійних системах, пірометрах, детекторах слабких сигналів в астрофізичних комплексах, океанології, лазерній техніці та ін. Тому ведуться інтенсивні пошуки матеріалів і структур, необхідних для створення гранично чутливих фотодетекторів слабких і надслабких сигналів як у дальній (довжині хвиль більш 30 мкм), так і в наддальній області ІЧ-спектра з довжинами хвиль, що наближаються до міліметрів. Частіше за все в якості ПВП у ближній ІЧ-області спектра використовуються германієві і InGaAs ФД [8-10].

Германієві ФД зазвичай демонструють більш високий, ніж кремнієві, рівень шумів і значний темновий струм, що сильно обмежує їхній динамічний діапазон. Рівень шуму зростає зі збільшенням активної площі ПВП. Основною причиною зростання рівня шуму є відносно низький шунтуючий опір приблизно 20 к $\Omega$  у германієвого ФД із активною площею 20 мм<sup>2</sup>. Вони також мають і переваги: рівномірну зональну характеристику і стабільний Кпер. Що правда, внутрішній квантовий вихід не дуже високий, у кращому випадку – від 30 до 90 %, а Кпер має сильну температурну залежність при  $\lambda > 1,55$  мкм [8,9].

InGaAs дозволяє, у принципі, створювати ПВП із високим внутрішнім квантовим виходом, але за станом на середину 90-их років він досягав значення від 90 до 95% для малоплощинних (до 7мм<sup>2</sup>) ОВП [8], при чому спеціально відібраний.

Був розроблений новий InGaAs ФД із близьким до одиниці внутрішнім квантовим виходом [10]. Він мав відносно високе значення шунтуючого опору, близьке до германієвих ФД, і міг вимірювати набагато нижчі потужності

ІЧ-випромінення. Із трьох таких ФД було зібрано трап-детектор з практично плоскою спектральною характеристикою перетворення в діапазоні довжин хвиль від 0,98 до 1,64 мкм.

Зусилля розробників ІЧ ОЕП спрямовані, по-перше, на вдосконалення одноелементних приладів, великих матриць із електронним скануванням і підвищення робочих температур, а по-друге, – на здешевлення й полегшення користування цими ОЕП.

У таблиці 1.2 наведені дані про типи фотонних ІЧ ОЕП, види переходів, вихідні електричні сигнали й матеріали, із яких вони виготовляються [10]. У таблиці 1.3 класифіковані теплові ІЧ ОЕП [10].

Таблиця 1.2 – Фотонні ІЧ ОЕП

Тип	Перехід	Режим	Матеріал
Власна електропровідність	Міжзонний	Фотопровідності Фотовольтаїчний Ємнісний	PbS, PbSe, InSb, HgCdTe, InSb, InAs, PbTe, HgCdTe, PbSnTe, InSb, HgCdTe
Домішкова електропровідність	Домішкова зона	Фотопровідності	Si:In; Si:Ga; Ge:Cu; Ge:Hg
Вільні носії	Міжзонний	Фотоемісійний Фотопровідності Захоплення фотонів	PtSi, Pt <sub>2</sub> Si, IrSi с бар'єром Шоткі, GaAs/CsO InSb електронний болометр, Ge
Квантові яма	До і/чи від просторових квантових рівней	Фотопровідності Фотовольтаїчний	HgTe/CdTe, GaAs/GaAlAs, InSb nipi, InAs/InGaSbSLS

Таблиця 1.3 - Теплові ІЧ ОЕП

<b>Детектор</b>	<b>Принцип дії</b>
Болометр: металічний; напівпровідниковий; надпровідниковий; фероелектричний; на гарячих електронах;	Зміни електричного опору
Термоелемент/термобатарея	Термо - ЕРС
Піроелектрик	Зміна спонтанного електричної поляризації
Приймач Голея	Теплове розширення газу
Край смуги поглинання	Оптичне пропускання напівпровідника
Піромагнетик	Зміна магнітних властивостей
Рідкий кристал	Зміна оптичних властивостей

Через різні типи шумів (генераційно-рекомбінаційний у фотонних і температурно-флуктуаційний у теплових ОЕП) ці два класи перетворювачів мають неоднакові залежності виявної здатності від довжини хвилі і температури. Це дозволяє дійти висновку про те, що здебільшого застосовують ці перетворювачі в якості детекторів фотонних ОЕП в довгохвильовому ІЧ-діапазоні й за низьких робочих температурах, крім того, для теплових ОЕП їх використовують наддовгохвильовому ІЧ-діапазоні при довжинах хвиль більше 100 мкм [8-10].

Сучасна тенденція побудови ІЧ-детекторів у тепловаченні характеризується розробкою великих, з електронною адресацією двох координатних матриць з високими робочими температурами. Передбачається, що неохолоджувальні ІЧ фокальні – матриці можуть зробити революцію у приладах нічного бачення [9,10].

Завдяки успіхам в розвитку молекулярно-пучкової епітаксії й осадження з парової фази методом хімічного розкладення металоорганічної сполуки стало можливим вирощувати, гнучкі шари InGaAs, що деформуються на різних підкладках, що забезпечує значне розширення спектрального діапазону чутливості таких детекторів. Крім того, ці структури можна використовувати



вати для побудови випромінювачів і модуляторів, які працюють у діапазоні довжин хвиль від правої межі видимого випромінення до 3,5 мкм. Засвоєння більш довгохвильового ІЧ діапазону приблизно до 15 мкм можливе за умови формування структур із відповідною шириною забороненої зони [10].

### 1.3 Фотометри і радіометри оптичного випромінювання

#### 1.3.1 Прецизійна фотометрична головка для вимірювання ІЧ випромінювання

Під фотометричною головкою (ФГ) розуміється частина фізичного фотометра, яка містить приймач випромінювання. Якщо ж останній є фотоелектричним, то як ФГ, так і відповідний фізичний фотометр належить до розряду фотоелектричних [11].

Залежно від похибки перетворення вхідної оптичної величини ФГ може служити вимірювальним перетворювачем (ВП) у робочому або еталонному фотометрі.

Прецизійна ФГ складається із шести частин:

- кремнієвого ФД; коригуючого фільтра; системи апертурних і вхідних діафрагм; внутрішнього корпусу; системи термостабілізації; зовнішнього корпусу.

В якості оптоелектронного перетворювача, звичайно, використовуються кремнієві фотодіоди (SiФД), які відкрили нові можливості для створення прецизійних фотометрів.

Для створення ФГ з фотоелектричним оптоелектронним вимірювальним перетворювачем (ОЕВП) необхідно в першу чергу відібрати і дослідити за сукупністю метрологічних параметрів різні типи кремнієвих фотодіодів (SiФД), а також розробити досконалу технологію виготовлен-

ня стабільних за часом світлофільтрів з коригуванням їх спектральної характеристики під  $V(\lambda)$  і мати можливість точного вимірювання спектрального коефіцієнта пропускання фільтра.

Широке використання кремнієвих фотодіодів визначається їх лінійністю в широкому діапазоні вимірювальних величин (10 порядків), а також стабільністю. Первинне калібрування залишається незмінним значно довше, ніж для будь-якого іншого сенсора. у зв'язку з цим, кремнієві фотодіоди використовуються як еталони – носії.

На рисунку 1.2 представлені спектральні чутливості кремнієвих фотодіодів [11].

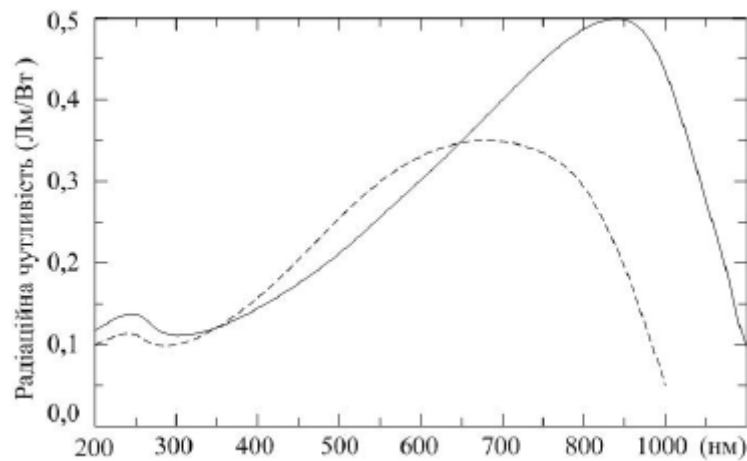


Рисунок 1.2 - Спектральна чутливість двох кремнієвих фотодіодів

Джерелами основної похибки фотометричного вимірювального пристрою (ВП) є неточності визначення його спектральної характеристики, а також нелінійність характеристики перетворення в діапазоні вимірювань. Джерелами допоміжної систематичної похибки можуть бути температурний і часовий дрейф (деградація) коефіцієнта перетворення ВП. Дуже важливою метрологічною характеристикою корегуючого фільтра служить спектральний коефіцієнт пропускання [11].

### 1.3.2 Ультрафіолетовий радіометр для вимірювання сигналів УФ випромінювання

У відповідності з рішенням Міжнародного конгресу з фізіотерапії та фотобіології спектр УФ випромінювання розділяють на три зони.

Зона А містить спектр від 400 до 320 нм, це довгохвильове УФ випромінювання, воно визначає слабку біологічну дію, стимулює флюоресценцію органічних речовин і збуджує свічення речовин у сигнальних, декоративних та інших пристроях. Зона В містить спектр від 320 до 275 нм, це середньохвильове УФ випромінювання. Воно пришвидшує регенеративні процеси, утворення пігменту, визначає антирахітичну дію на організм, сприяє утворенню вітаміну D в підшкірних клітинах, стимулює ріст домашніх птахів, тварин і т.п. Для зони С – діапазон від 275 до 180 нм. Це короткохвильове УФ випромінювання, яке викликає характерні зміни структури білків і ліпідів і має бактеріальну дію [12, 13].

Була розроблена конструкція фотоприймача для реєстрації УФ випромінювання на основі фосфіду галію, зона спектральної чутливості якого складає 220–550 нм. Потенційним бар'єром, який розділяє фотогенеровані носії, заряду в ньому, служить поверхневий бар'єр між самопровідною плівкою окислу металу і фосфідом галію. Фотодіод містить епітаксіальний шар фосфіду галію n-типу провідності на підложці із фосфіду галію того ж типу провідності, захисний шар діелектрика з вікном на поверхні епітаксіального шару. На його поверхні розташований тонкоплівочний прозорий електрод, виготовлений із двоокисла олову, легований фтором з концентрацією домішок не менше  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. На зворотній поверхні підложки формується суцільний металічний контакт. Така конструкція фотодіода забезпечує достатньо великі значення порогової чутливості та мінімальні значення порогової чутливості в УФ зоні спектра. На рисунку 1.3 приведено зовнішній вигляд розробленого фотодіода, а на рисунку 1.4 – його відносну спектральну характеристику чутливості [14].



Рисунок 1.3 - Зовнішній вигляд фотодіода на основі фосфіду галію для реєстрації УФ випромінювання

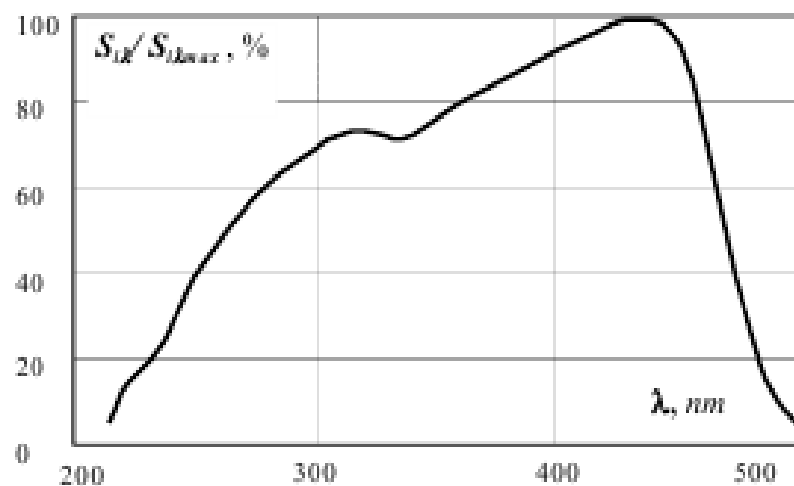


Рисунок 1.4 - Відносна спектральна характеристика чутливості розробленого фотодіода для реєстрації УФ випромінювання

На базі розробленого фотодіода на основі фосфіду галію розроблена головка радіометрична, яка призначена для вимірювання енергетичної освітленості в УФ зоні спектра [15]. Головка складається із фотодіода, косинусної насадки, корпусу і кабелю з'єднувального. Для визначення освітленості в зонах А, В, С спектра використовується система скляних і інтерференційних фільтрів. Відносні характеристики спектральної чутливості головки з різними фільтрами приведені на рисунку 1.5.

Застосування комбінації скляних та інтерференційних фільтрів дозволяє повністю перекрити діапазони УФ випромінення. При цьому діапазон вимірюваної освітленості складає  $10^{-4}$ – $10^3$  Вт/м<sup>2</sup>, нелінійність енергетичної характеристики складає не більше 10 % для серійних зразків і не більше 5 % для еталонних [15].

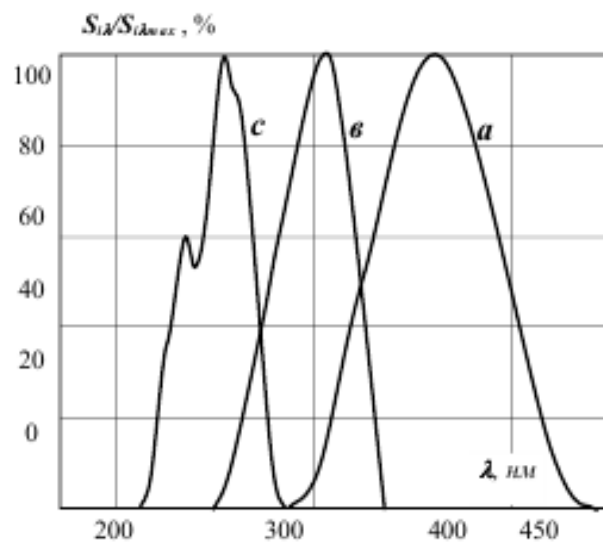


Рисунок 1.5 - Відносна спектральна характеристика чутливості радіометричної головки з інтерференційним фільтром (с) і з скляним фільтром (а, в)

Зовнішній вигляд радіометра приведений на рисунку 1.6. Радіометр складається з електронного блока, радіометричної головки, змінних світлофільтрів типу А, В і С і блока живлення. Структурна схема радіометра УФР– 21 приведена на рисунку 1.7 [15].



Рисунок 1.6 - Зовнішній вигляд радіометра



Рисунок 1.7 - Структурна схема УФ-радіометра: 1 – головка радіометрична; 2 – перетворювач струм-напруга (ПСН); 3 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 4 – рідиннокристалічний індикатор (РКІ)

Потік вимірювання від джерела випромінення потрапляє на фоточутливий елемент головки радіометричної (1), генерує фотострум, який перетворює ПТН (2) у пропорційну йому напругу постійного струму. Блок АЦП (3) перетворює напругу в цифровий код, який виводиться на індикатор.

Але, вимірювання УФ випромінення ускладнюється тим фактом, що реальна спектральна характеристика чутливості радіометричної головки відрізняється від ідеальної.

Існує багато широко розповсюджених фотометричних головок з хорошим спектральним коригуванням [16]. Використання сучасної обробки сигналу може суттєво підвищити їх застосовуваність. Сучасна обробка дозволяє проводити коригування сигналу, яка зменшує вплив нелінійності, а калібрування в різних типах випромінення знімає питання про якість спектрального коригування. Є фотометричні головки не тільки з чутливістю, редукованою до  $V(\lambda)$ , але і до УФ випромінення в зонах А, В, С, а також багатофільтрові радіометри. З іншого боку, вже більше спостерігається розповсюдження і використання персональних комп'ютерів і ноутбуків, які стали необхідним елементом вимірювальної лабораторії. У зв'язку з цим стає актуальною розробка приладу, здатного передбачати дані вимірювань існуючих фотометричних головок у ПК, де вони можуть зберігатися й оброблятися. Очевидно, що і відповідне програмне забезпечення для обробки вимірювань також необхідне.

Тому, метою роботи є дослідження та розробка пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

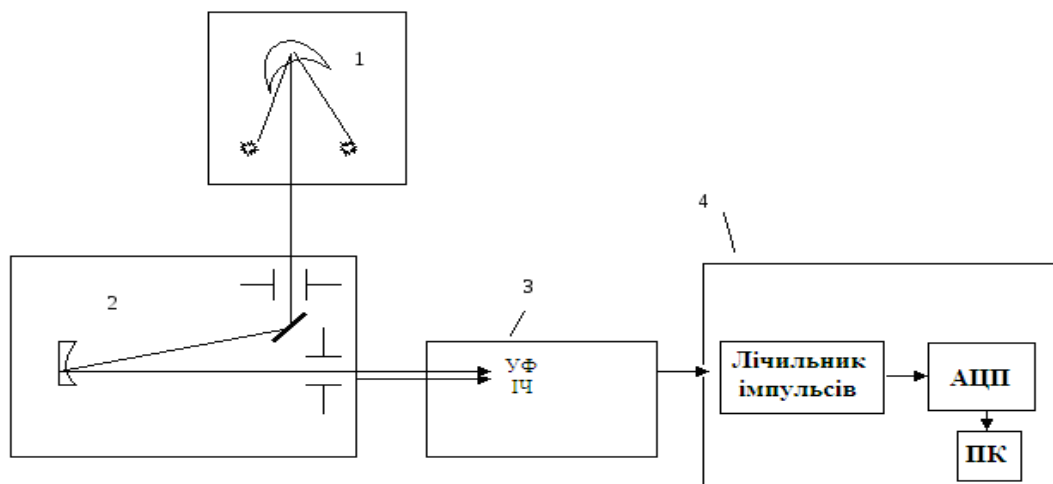
- 1) провести аналіз сучасних способів реєстрації оптичних сигналів та обрати для найбільш оптимальний для використання у якості прототипу;
- 2) розробити структурну схему пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів;
- 3) розробити електричні схеми основних апаратурних блоків пристрою;
- 4) провести моделювання роботи електричних схем пристрою за допомогою сучасних САПР;
- 5) виконати розрахунки по техніко-економічному обґрунтуванні розробки пристрою та розробити заходи по умовам дотримання техніки безпеки та охорони праці робіт, що планується здійснити.

## 2 Дослідження та розробка пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

### 2.1 Структурна схема пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

За основу структурної схеми пристрою використовуємо принцип реєстрації та обробки сигналу у стандартному спектрофотометрі СФ 46 [17]. У схемі вводимо наступні спрощення: виключимо блок кювет та зменшимо габаритні розміри оптичної системи, що дещо зменшить роздільну здатність реєстрації. Проте це не вплине на загальну картину проведення експерименту.

Структурна схема пристрою після спрощень стандартної системи представлена на рисунку 2.1.



1 – джерело випромінювання;

2 – монохроматор;

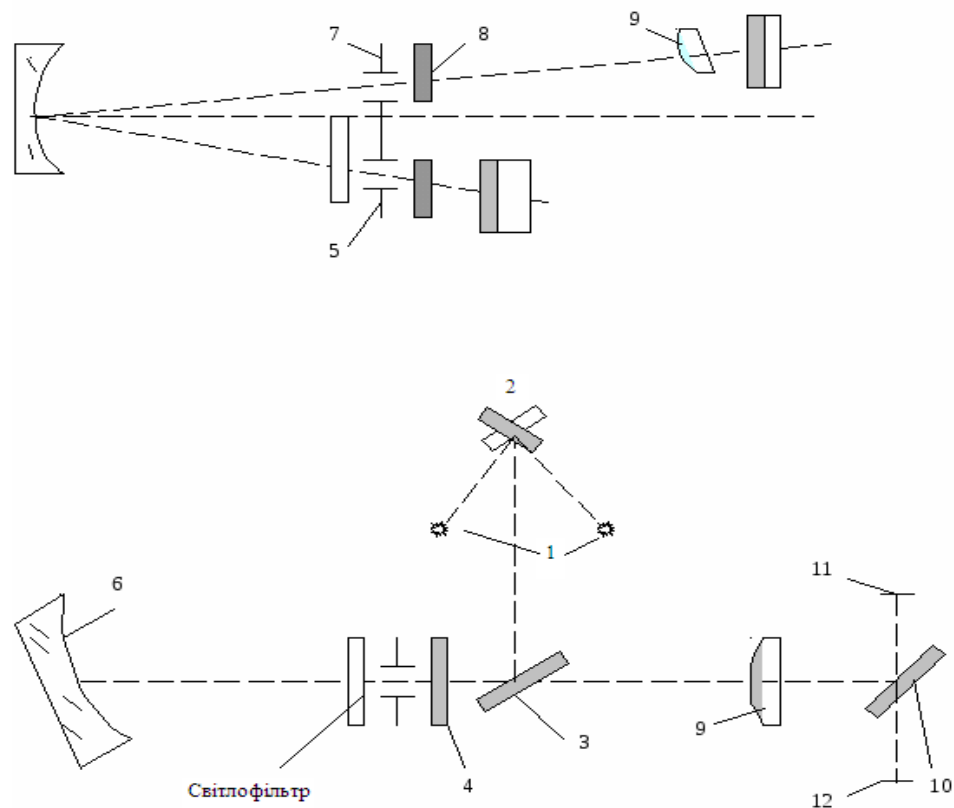
3 – [блок реєстрації](#);

4- система обробки сигналів.

Рисунок 2.1 – Структурна схема пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів



Оптична система монохроматора представлена на рисунку 2.2.



- 1- джерело випромінювання;
- 2- на дзеркальний конденсор;
- 3- плоске поворотне дзеркало;
- 4- лінза;
- 5, 7 - щілини діафрагми;
- 6 - дифракційна ґратка;
- 8, 9 – лінзи;
- 10 – поворотне дзеркало;
- 11, 12 – фотоелементи.

Рисунок 2.2 – Оптична система монохроматора

Випромінювання від джерела 1 падає на дзеркальний конденсор 2, який направляє його на плоске поворотне дзеркало 3 і дає зображення джерела випромінювання в площині лінзи 4, розташованої поблизу вхідної щілини 5 монохроматора.

Монохроматор побудований за вертикальною схемою автоколімації [17].

Проходячи через вхідну щілину випромінювання падає на увігнуті дифракційні ґрати 6 із змінним кроком і криволінійним штрихом. Дифракційні ґрати, окрім диспергуючих властивостей, володіють властивістю фокусувати спектр. Використання змінного кроку і криволінійного штриха значно зменшує абераційні спотворення увігнутих дифракційних ґрат і дозволяє отримати високу якість спектру у всьому робочому діапазоні.

Дифрагований пучок фокусується в площині вихідної щілини 7 монохроматора, розташованої над вхідною щілиною 5. Сканування здійснюється поворотом дифракційних ґрат, при цьому монохроматичне випромінювання різних довжин хвиль проходить через вихідну щілину 7, лінзу 8, контрольний або вимірюваний зразок, лінзу 9 і за допомогою поворотного дзеркала 10 падає на світлочутливий шар фотоелемента 11 або 12.

Для зменшення розсіяного світла і зрізу вищих порядків дифракції в спектрофотометрі використовуються два світлофільтри: із скла ПС11 для роботи в області спектру 230 – 450 нм і із скла ОС14 для роботи в області спектру 600 – 1100 нм. Зміна світлофільтрів виконується автоматично [17].

Лінзи виготовлені з кварцевого скла з високим коефіцієнтом пропускання в ультрафіолетовій області спектра. Для забезпечення роботи стандартного спектрофотометра в широкому спектральному діапазоні зазвичай використовуються два фотоелементи: 1) сурм'яно-цезієвий фотоелемент з вікном з кварцевого скла - застосовується для вимірів в області спектру від 190 до 700 нм; 2) киснево-цезієвий фотоелемент – для вимірів в області спектру від 600 до 1100 нм [17].

Використання цих елементів викликає труднощі в процесі експлуатації – складні в налаштуванні і досить дорогі за вартістю. До того ж, при переключенні із одного діапазону випромінювання на інший доводиться враховувати додаткове калібрування та різницю інтенсивності вимірювального світлового потоку.

Тому, в роботі пропонується розвести оптичні канали кожен окремо із пристроями реєстрації та обробки сигналів.

## 2.2 Реєстрація УФ випромінювання

### 2.2.1 Використання напівпровідників ZnO у якості фотоелектричного перетворювача

Зростаюча необхідність в твердотілих джерелах і приймачах світла в синій і ультрафіолетовій (УФ) областях спектру стимулювала останніми роками інтенсивне дослідження широкозонних напівпровідників. Основні зусилля розробок в цих напрямках сконцентровані довкола GaN (ширина забороненої зони  $E_g=3.5\text{эВ}$ ), ZnO ( $E_g = 3.4\text{эВ}$ ), ZnSe ( $E_g=2.9\text{эВ}$ ), 6H-SiC ( $E_g=3\text{эВ}$ ).

Вражаючий прогрес досягнутий в матеріалах на основі GaN. На базі GaN і його сплавів створені світловипромінюючі і лазерні діоди у видимій області спектру (460 нм) [18, 19]. Проте для ефективного випромінювання потрібна висока концентрація In в InGaN, що збільшує поглинання в УФ області і робить проблематичним використання матеріалів на базі GaN для створення УФ напівпровідникових приладів [20]. Великий інтерес як альтернатива GaN для приладових завдань представляє ZnO. Оксид цинку, що володіє високою радіаційною, хімічною і термічною стійкістю, широко використовується при створенні різних приладів, зокрема для формування прозорих контактів сонячних елементів. Завдяки своїм унікальним оптичним, акустичним і електричним властивостям оксид цинку знайшов широке використання в газових сенсорах, варисторах, пристроях генерації поверхневих акустичних хвиль [21]. Будучи прозорим в широкій області спектру, ZnO володіє високою стійкістю до опромінення, він податливий до хімічного травлення і

відносно дешевий, що робить його привабливим для використання в мікроелектроніці [24,25].

Легування плівок ZnO деякими елементами призводить до збільшення ширини забороненої зони, збільшення енергії активації донорних центрів і їх стабільності [26]. Автори робіт [26] рентгено-структурним методом досліджували вплив легування кадмієм, магнієм і сіркою на структурні характеристики плівок ZnO і спостерігали збільшення параметру ґратки при зростанні концентрації домішки. Легування елементами III групи — алюмінієм, галієм, індієм дозволяє отримати плівки n-ZnO з високою провідністю.

Отже, для розробки фотореєструючого каналу приладу було обрано напівпровідники ZnO, леговані Ga.

Характерні спектри пропускання напівпровідників ZnO, нелегованих та легованих Ga, представлено на рисунку 2.3 [25].

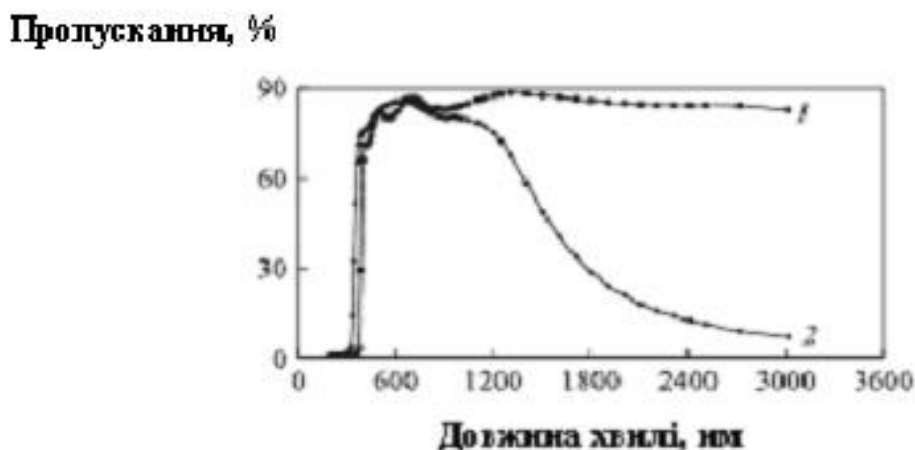


Рисунок 2.3 – Спектр пропускання нелегованих напівпровідників ZnO (1), та напівпровідників ZnO, легованих Ga (2)

Із аналізу кривих випливає, що використовуючи напівпровідники ZnO, леговані Ga, можна розширити реєструючу здатність приладу до області спектру, близької до УФ. Аналіз пропускання напівпровідників ZnO, легованих Ga, в залежності від вмісту легата представлено на рисунку 2.4 [25].

**Пропускання, %**

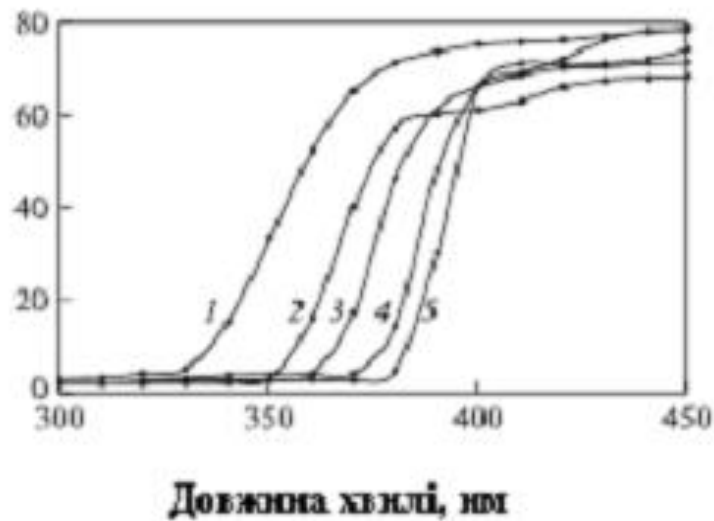


Рисунок 2.4 - Спектр пропускання напівпровідників ZnO, легованих Ga (ат.%): 1 – 2,5 ат.%, 2 – 1,25 ат.%, 3 – 0,5 ат.%, 4 – 0,125 ат.%, 5 – 0 ат%

Отже, із аналізу кривих пропускання напівпровідників ZnO, легованих Ga в залежності від концентрації домішок, видно, що найбільш вигідним для використання у якості реєструючого елемента слід використати напівпровідники ZnO, легованих Ga з вмістом 2,5 ат.%.

Для дослідження поверхневого опору плівок ZnO:Ga був використаний чотирьохзондовий метод. Установка для проведення вимірів поверхневого опору плівкових зразків ZnO:Ga чотирьохзондовим методом (рисунок 2.5) складалася з маніпулятора з чотирьохзондовою голівкою, джерела стабілізованого струму і мілівольтметра. Всі чотири зонди розташовувалися на одній лінії і індивідуально притискалися до поверхні за допомогою S-подібних пружин з вольфрамового дроту. Чотирьохзондова голівка кріпилася до маніпулятора [26].

Виміри  $U$  і  $I$  для кожного досліджуваного зразка проводилися шість разів: для значень напруги 1В, 2.5В, 4В при різній полярності джерела струму. Поверхневий опір плівок  $R_{\square}$  визначався по формулі [26]:

$$R_{\square} = F_i * U_{23} / I_{14} \quad (2.1)$$

де  $I_{14}$ - величина струму, що протікає через крайні зонди голівки 1и 4;  $U_{23}$  - падіння напруги на середніх зондах 2,3;  $F_i$ - коефіцієнт форми.

Залежно від геометричних розмірів зразка по градуйованому графіку визначався коефіцієнт форми. Основна погрішність у визначення  $R_{\square}$  обумовлена незначним варіюванням відстані між зондами при проведенні вимірів. Величина погрішності у визначенні  $R_{\square}$  складала 3%. Величина питомого опору зразка визначалася відповідно до виразу[26]:

$$\rho = R_{\square} * t \quad (2.2)$$

де,  $t$  – товщина плівок.

У таблиці 2.1 наведені результати вимірювання поверхневого опору плівок ZnO:Ga, виготовлених за різними температурами підкладки. Можна бачити, що поверхневий опір спочатку зменшується із зростанням температури, потім зростає. Таке зростання пояснюється набуванням значної долі полікристалічної фази у структурі плівки [26].

Таблиця 2.1 - Зміна поверхневого опору плівок ZnO:Ga товщиною 424 нм, отриманих при температурах від 300<sup>0</sup>С до 450<sup>0</sup>С

T, °C	300	350	400	450
$R_s,$ Ом/см <sup>2</sup>	$1,8 \cdot 10^6$	$6,8 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^5$	$9,6 \cdot 10^5$

Таким чином, можливість використання фотоелектричних перетворювачів на основі напівпровідників ZnO:Ga. з вмістом домішок 2,5 ат.% дає можливість розширити область реєстрації ФЕП в УФ діапазоні до 340 нм.

### 2.2.2 Електрична схема каналу реєстрації УФ випромінювання

Конструктивно канал реєстрації складається з блока вимірювальної комірки та блока перетворення сигналів. Блок вимірювальної комірки включає реактор, фоточутливі елементи та мостовий вимірювальний перетворювач. Оскільки, за результатами експериментальних досліджень

фоторезисторів, найбільш чутливими до синьо-зеленого спектру біоломінесценції виявились ФЕП на основі ZnO:Ga, були використані саме ці елементи. В той же час, дані фоторезистори мають досить великий температурний коефіцієнт, тому в процесі досліджень було визнано доцільним використовувати диференційний ФЕП з мостовим включенням (рисунок 2.5).

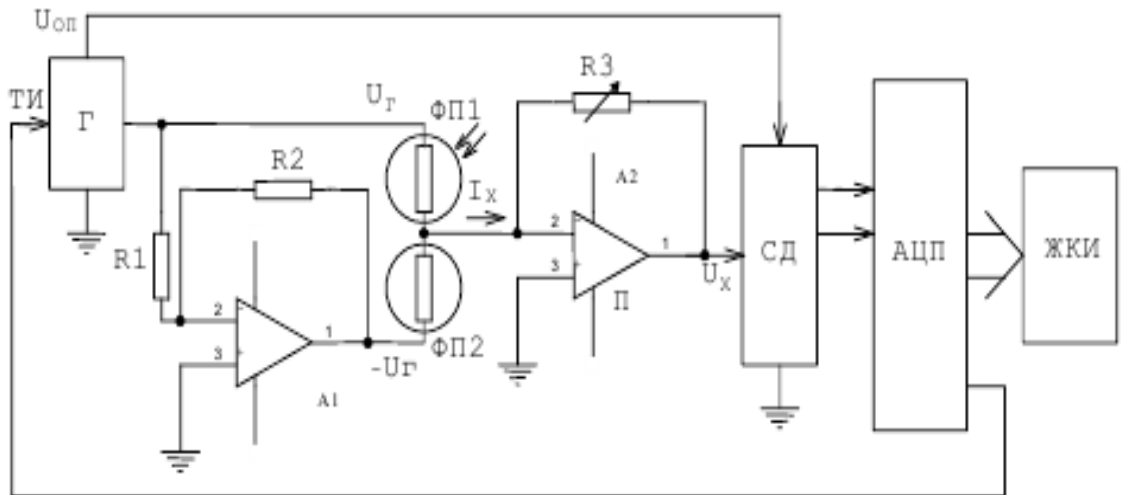


Рисунок 2.5 – Електрична схема реєстратора УФ випромінювання на ФЕП ZnO:Ga

Балансування моста здійснювалось регулюванням резисторів  $R_{1,2}$  в інверторі напруги живлення. Для імітації біоломінесценції використовувався мініатюрний світлодіод з синьо-зеленим світінням в шприці 3, з якого попередньо був видалений поршень. Світлодіод був оснащений розсіювачем світла. Струм через світлодіод був підібраний таким чином, щоб світіння на поверхні розсіювача відповідало рівню світіння при типових біохімічних реакціях. При вмиканні і вимиканні струму (близько 10 мкА) через світлодіод визначалась зміна відліку на дисплеї та вивчалась форма сигналу на виході перетворювача струм-напруга. Як показали дослідження вольт-амперних характеристик фоторезисторів на основі ZnS, цим елементам притаманна нелінійність. Тому для отримання ефективної

роботи диференційного ФЧЕ необхідно було підібрати пару фоторезисторів (робочий і темновий) з близькими вольт-амперними та температурними характеристиками, а також визначити максимально допустимий рівень робочої напруги на фоторезисторах, при яких рівень нелінійних спотворень не приводив би до суттєвого підвищення рівня вищих гармонік в вимірювальному сигналі.

З точки зору підвищення чутливості схеми бажано підвищувати робочу напругу, але збільшення рівня вищих гармонік призводить до нелінійності характеристики перетворення люмінометра та до підвищення випадкових похибок. З огляду на викладене, визначено оптимальний рівень робочої напруги, який становив для використаних фоторезисторів 0,7 В. Ще одним питанням, яке вирішувалось при макетуванні, було визначення оптимальної робочої частоти вимірювального сигналу. Цей параметр залежить від співвідношення ємнісної і активної провідності фоторезистора. Вимогою тут є перевищення активної провідності над ємнісною. Для вибраних зразків фоторезисторів активна провідність перевищує ємнісну на частотах нижчих за 100 Гц. При виборі оптимальної робочої частоти слід враховувати, що на частотах 10 Гц і нижче різко збільшуються шуми напівпровідникових підсилювачів. Тому бажано вибирати робочу частоту не менше 20 Гц. Якщо прилад працює без модулятора світлового потоку, це значення може бути прийняте за оптимальне. При роботі з модулятором частоту модуляції бажано встановити 25 Гц (в 2 рази менше частоти мережі 50 Гц) для усунення зовнішніх електромагнітних перешкод. При цьому частота робочої напруги не повинна співпадати з частотою мережі та повинна бути синхронізована з частотою модуляції і перевищувати останню в кілька разів, таким чином становлячи оптимально 75 Гц. В досліджуваному макеті за рахунок використання модулятора світлового потоку дозволяє підвищувати чутливість вимірювального каналу в 1,4 разів. Для більш стабільної роботи блоку модуляції необхідно створити умови постачання живлення.



Реальна чутливість створеного макету характеризується досягнутим співвідношенням приросту показань, що знімаються з цифрового табло при появі світлового потоку, та варіацій цих показань під дією завад. Як вище вказувалось, в процесі досліджень свічення, яке еквівалентне біолоюмінесценції, було встановлене на рівні типових біохімічних реакцій, що продукують люмінесценцію. В цих умовах при оптимальних параметрах режимів приладу отримано приріст показань 10-20 одиниць дискретності відліку при амплітуді їх варіацій 2-3 одиниці. Усереднене значення варіацій відліку при цьому становило 1-2 одиниці при усередненні за 5 відліками.

Таким чином, показано, що застосування запропонованих технічних рішень дозволяє створити простий біолоюмінометричний прилад з мінімально необхідною чутливістю. Використання модуляції світлового потоку з зони реакції дозволить додатково підвищити чутливість до рівня практично прийнятної метрологічної надійності.

Для системи управління блоком реєстрації УФ випромінювання затвором було розроблено блок живлення.

Пристрої, зібрані на напівпровідникових приладах живляться від джерел постійної напруги. Як правило, відхилення напруги від номінального значення не повинні виходити за кордони певних допусків (наприклад, для мікросхем серії K155 живляча напруга повинна складати  $5\text{В} \pm 5\%$ ). Тому джерело живлення пристроїв окрім трансформатора і випрямляча повинне містити ще і стабілізатор напруги.

Основою стабілізатора напруги найчастіше служить кремнієвий стабілітрон, включений у зворотному напрямі (катодом до позитивного полюса джерела живлення, анодом – до негативного). При такому включенні напруга на стабілітроні (напруга стабілізації  $U_{ст}$ ) залежить від струму через стабілітрон (струму стабілізації  $I_{ст}$ ). Ці дві величини і є основними параметрами стабілітронів. Так, для стабілітрона КС156А напруга стабілізації (номінальна) складає 5,6 В (при номінальному струмі стабілізації 10 мА), а

струм стабілізації може бути в межах 3...50 мА. Якщо навантаження споживає більший струм, застосовують підсилювач струму. У простому випадку це може бути транзистор, включений за схемою із загальним колектором (емітерний повторитель).

Схема такого джерела живлення показана на рисунку 2.6.

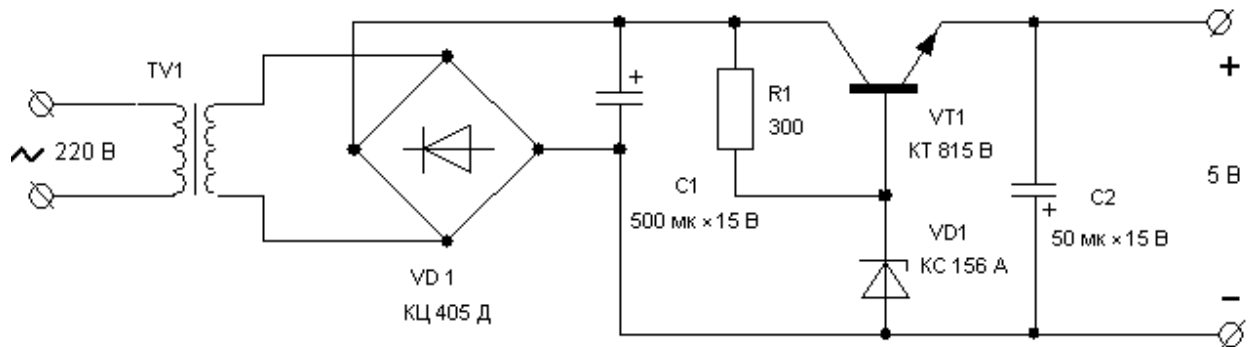


Рисунок 2.6 – Схема стабілізованого джерела живлення блоку реєстрації УФ випромінювання

Напруга мережі, знижена трансформатором Т1 до 8...10 В, випрямляється діодним мостом VD1 і подається на стабілізатор напруги, в якій транзистор VT1 включений емітерним повторювачем. Напруга на виході стабілізатора на 0,5...1 В менше напруги на стабілітроні VD2. За аналогічною схемою можна будувати стабілізатори і на інші значення живлячої напруги, слід лише для кожного випадку підібрати відповідний стабілітрон і опір резистора R1. Максимальний вихідний струм стабілізатора  $I_{\text{вихmax}}$  залежить від використовуваного стабілітрона і статичного коефіцієнта передачі струму транзистора  $h_{21э}$  і може бути знайдений по формулі

$$I_{\text{вихmax}} = h_{21э} \times I_{\text{ст max}} \quad (2.3)$$

Стабілізатор напруги, зібраний за схемою на рис. 2.6, володіє порівняно невисокими експлуатаційними характеристиками, проте може успішно застосовуватися для живлення багатьох радіотехнічних пристроїв.

На рисунку 2.7 приведена схема ще одного стабілізатора напруги, але з використанням операційного підсилювача (ОП).

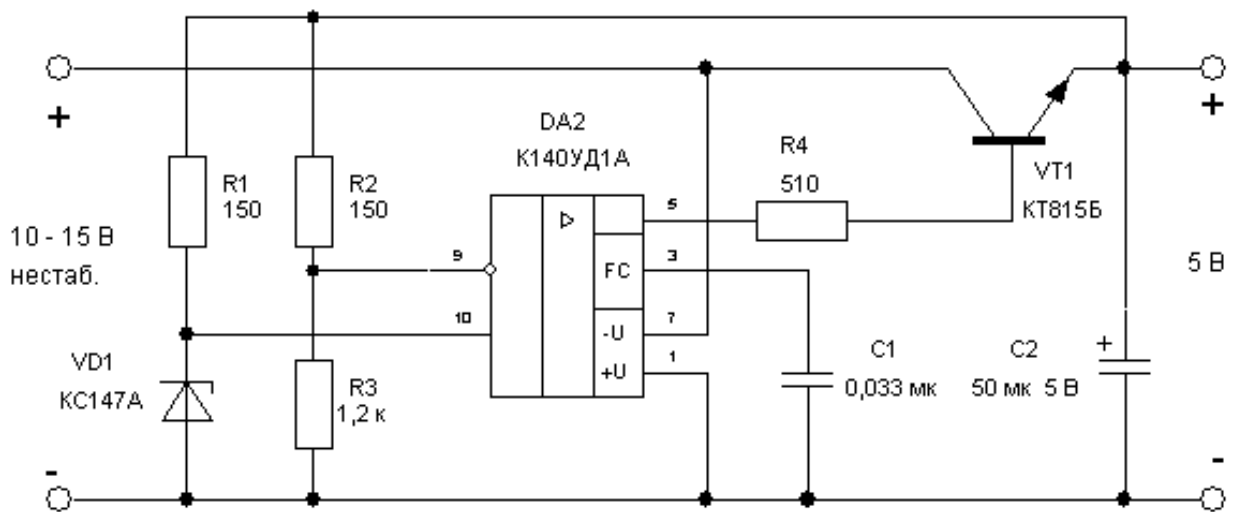


Рисунок 2.7 – Схема стабілізатора напруги з використанням операційного підсилювача

Такі підсилювачі мають дуже великий коефіцієнт посилення (декілька сотень і навіть тисяч) і два входи - що інвертує і не інвертує. Сигнали, подані на ці входи, підсумовуються з врахуванням їх знаку і багато разів посилюються. Характерна особливість стабілізатора напруги із застосуванням ОП полягає в тому, що в ньому вихідна напруга порівнюється із еталонним (опорним) і таким чином підтримується на заданому рівні.

Розглянемо за схемою детальніше роботу такого стабілізатора напруги. Вихідна напруга з ділянки R2R3 подається на інвертуючий вхід ОП, а опорна напруга, що знімається із стабілітрона VD1, - на неінвертуючий вхід. При невеликій зміні напруги на виході стабілізатора на інвертуючому вході (вивід 9) з'являється сигнал розузгодження, який багато разів посилюється і змінює напругу на регулюючому транзисторі VT1 таким чином, що напруга на виході стабілізатора практично не змінюється. Цей процес триває всього декілька мікросекунд.

Напругу на виході стабілізатора можна визначити за спрощеною формулою:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{ст}} (R2+R3) / R3 \quad (2.4)$$

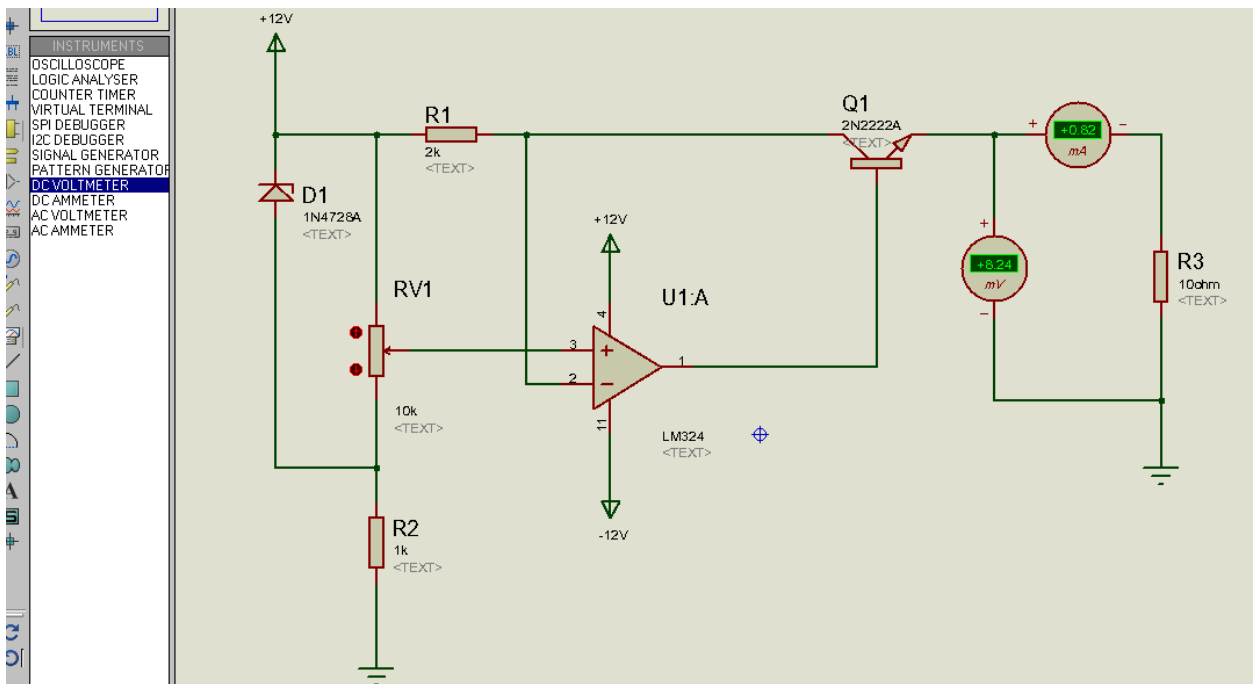
Змінюючи в невеликих межах опори резисторів R2 і R3, можна змінювати вихідну напругу стабілізатора. При цьому, як видно з формули, вихідна напруга не може бути менше напруги стабілізації стабілітрона.

Резистор R4 обмежує вихідний струм ОП, конденсатор C1 запобігає збудженню пристрою. Коефіцієнт стабілізації цього джерела напруги складає 200...400, а вихідний опір - декілька міліом. Максимальний вихідний струм дорівнює добутку гранично допустимого вихідного струму ОУ на коефіцієнт  $h_{21э}$  транзистора VT1 і для даної схеми складає 500... 600 мА. Якщо ж для живлення пристрою потрібний більший струм, який може забезпечити один регулюючий транзистор, слід застосовувати складений транзистор (наприклад, типу КТ972, КТ825, КТ827). За відсутності складеного транзистора в одному корпусі його можна виконати з двох звичайних транзисторів однієї або різних структур.

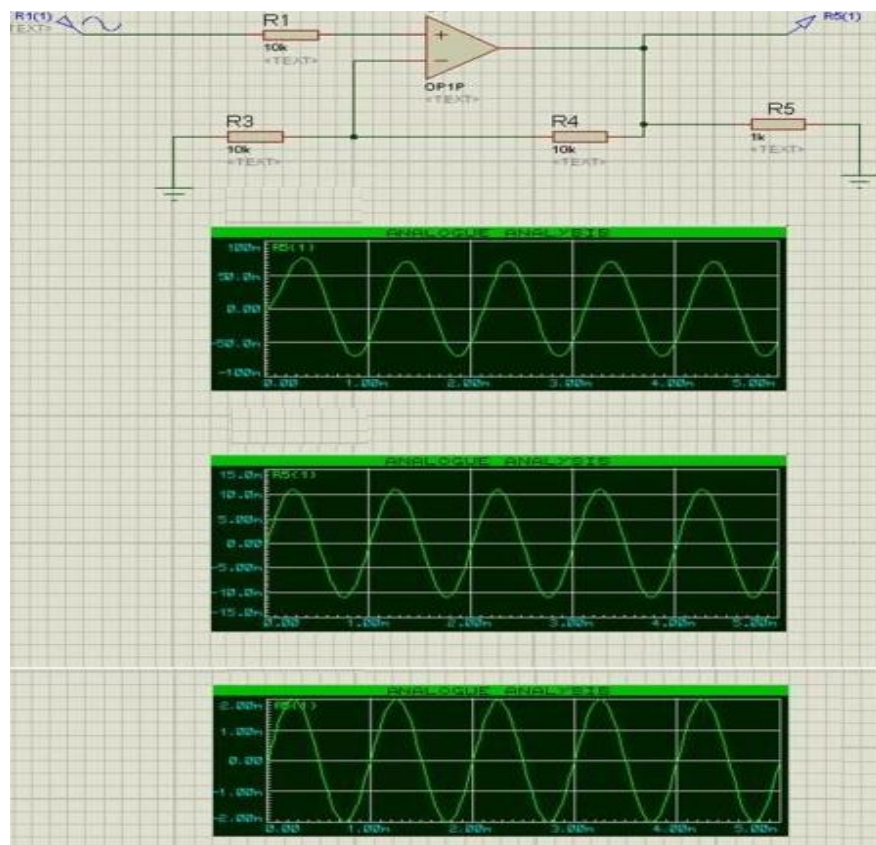
### 2.2.3 Моделювання роботи стабілізатора напруги в середовищі Proteus

Для перевірки правильного функціонування стабілізатора напруги було проведено моделювання його схеми в програмному середовищі Proteus. Результати моделювання представлено на рисунку 2.8.

Як видно із рисунка 2.8, сигнал на виході пристрою має достатньо стабільний характер.



а)



б)

Рисунок 2.8 – Моделювання стабілізатора апрути джерела живлення реєстратора УФ випромінювання в середовищі Proteus: а – електрична схема; б) – покази осцилографа

## 2.3 Реєстрація ІЧ випромінювання

Реєстрація сигналу здійснюється як в режимі рахунку фотонів, так і в аналоговому. Тому, як фотоприймачі використовуються фотопомножувачі ФЕП Н10720-20, що мають область максимальної спектральної чутливості 600 нм [27]. Темновий струм цих ФЕП малий в порівнянні з сигналом фонового засвічення вже при кімнатній температурі. При встановленому порозі дискримінації частота рахунку одноелектронних імпульсів не перевищує 1000 Гц, що дозволяє застосовувати ФЕП без додаткового охолодження.

### 2.3.1 Електрична схема блоку живлення для фотоелектронного приймача ІЧ діапазону

Забезпечення достатнього динамічного діапазону досягається за рахунок корекції напруги живлення ФЕП. Для використання в роботі рекомендовано ФЕП Н10720-20. Для ФЕП Н10720-20 розроблено нове високовольтне імпульсне джерело живлення. Його основні переваги наступні:

- 1) блок має захист від коротких замикань;
- 2) можливість обмеження вихідної напруги користувачем;
- 3) збереження параметрів в незалежній пам'яті;
- 4) десять передумовок вихідної напруги;
- 5) ІЧ -дистанційне управління.

В таблиці 2.2 надано основні характеристики блоку живлення.

На рисунку 2.9 представлена електрична схема блоку живлення

Таблиця 2.2 - Основні характеристики блоку живлення фотоелектричного приймача ІЧ випромінювання

Вихідна напруга, В	до 2500
Струм навантаження, мА	до 3
Нестабільність вихідної напруги, %	0,05
Пульсація вихідної напруги, мВ	20

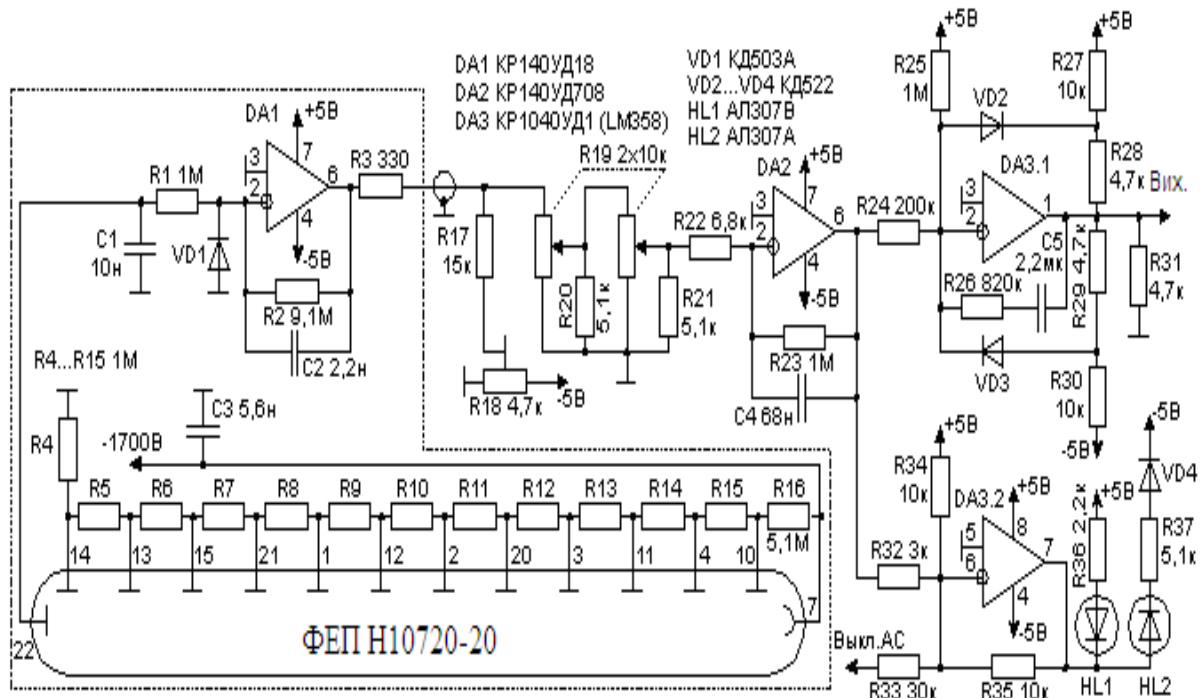
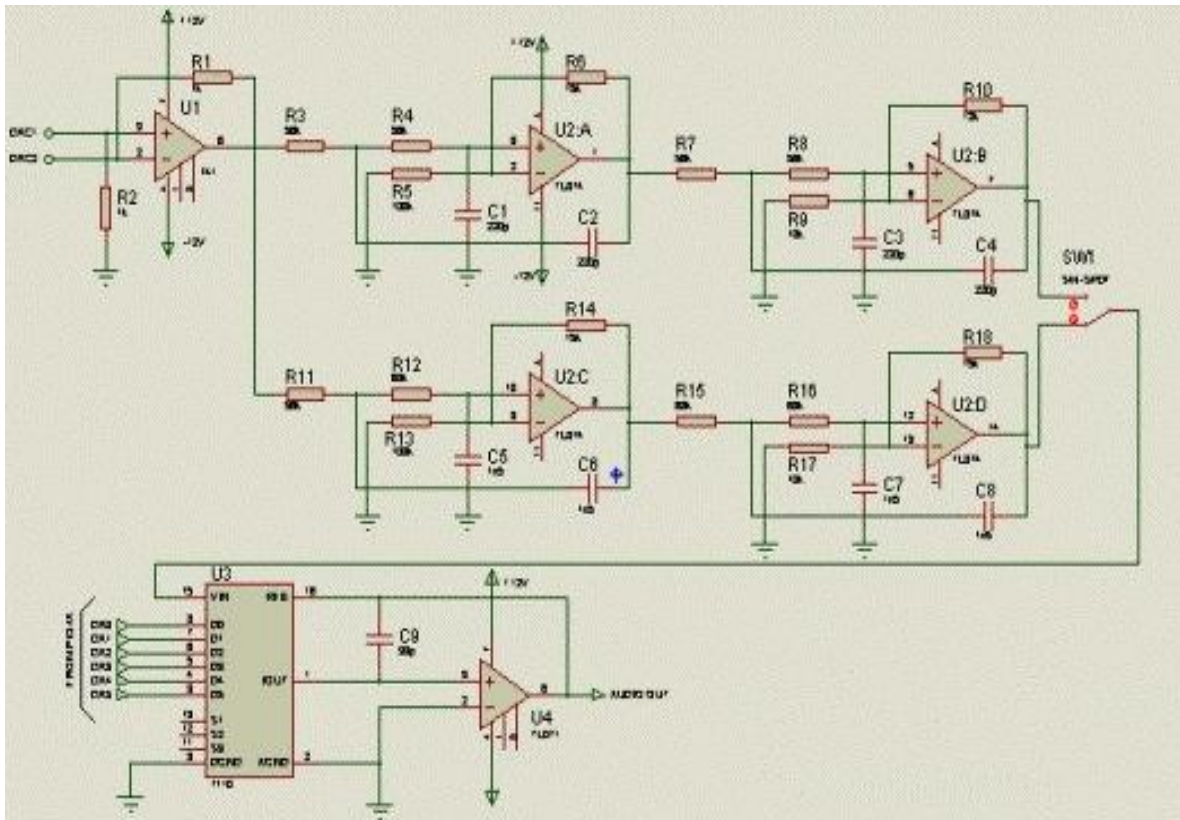


Рисунок 2.9 – Електрична схема блоку живлення для фотоелектронного приймача ІЧ випромінювання

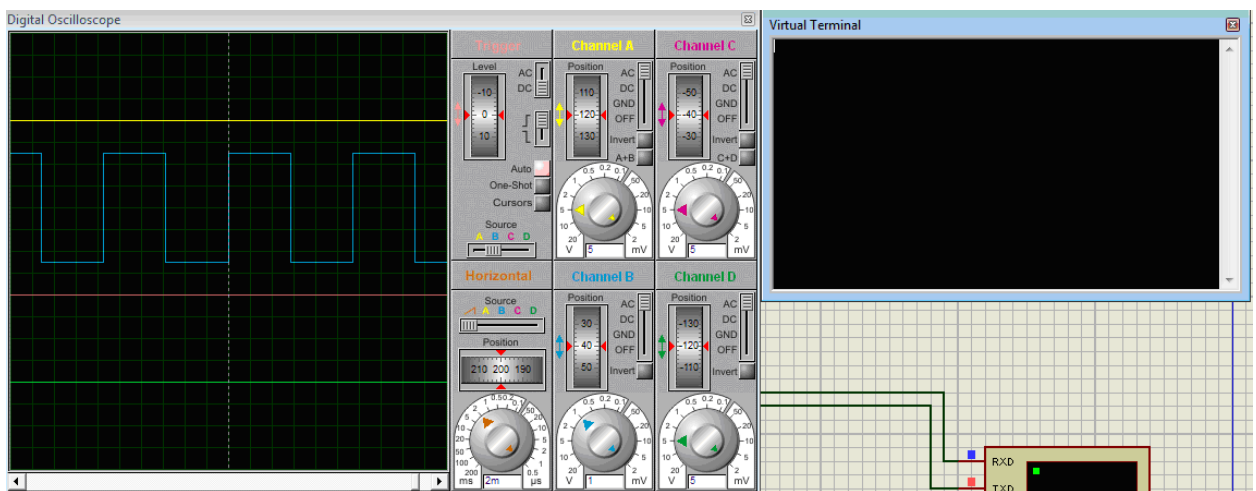
### 2.3.2 Моделювання роботи блоку живлення для фотоелектронного приймача ІЧ випромінювання

У схемі, зображеній на рисунку 2.9, підсилювальний блок який складається із операційних підсилювачів, для спрощення моделювання в середовищі Proteus було замінено на мікросхему UC3485.

На рисунку 2.10 представлено результати моделювання блоку живлення фотоелектронного приймача ІЧ випромінювання.



а)



б)

Рисунок 2.10 - Результати моделювання блоку живлення фотоелектронного помножувача в середовищі Proteus: а – електрична схема; б) – покази осцилографа.

Покази осцилографа свідчать про стабільний режим роботи моделі блоку живлення фотоелектронного помножувача ІЧ випромінювання.



## 2.4 Електрична схема лічильника імпульсів пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

Досить важливим питанням при розробці пристроїв реєстрації оптичних сигналів є необхідність кількісної оцінки енергії, яка надійшла до ФЕП. Одним із методів оцінки енергії є підрахунок фотонів, які пройшли каналом реєстрації. Для цього необхідно мати досить простий, але надійний лічильник світлових імпульсів. У роботі представлено лічильник, який засновано на мікросхемі CD4026, яка дає можливість звести до мінімуму супутні елементи навантаження. Зовнішній вигляд та функціональне призначення вивідів мікросхеми представлено на рисунку 2.11 [28].

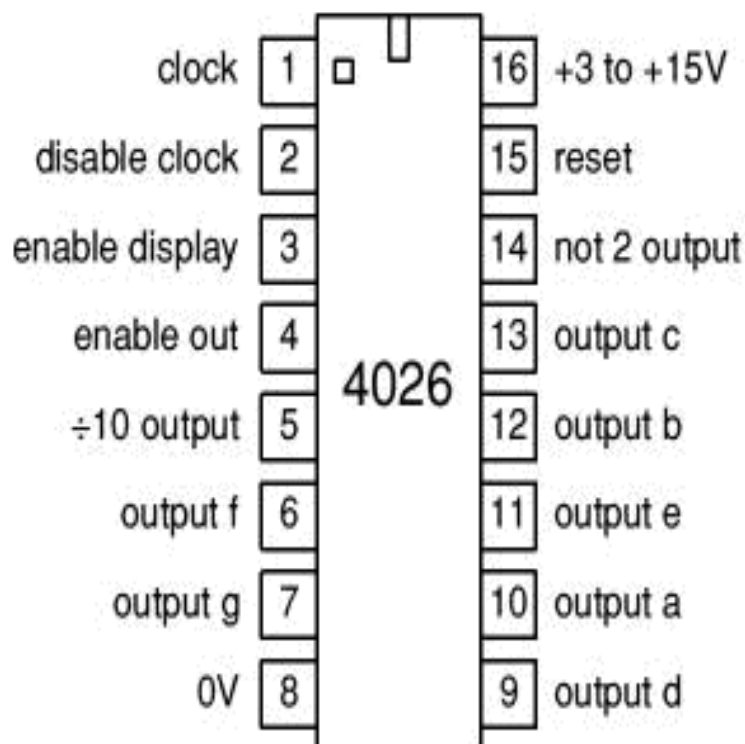


Рисунок 2.11 - Зовнішній вигляд та функціональне призначення вивідів мікросхеми CD4026

Покази лічильника збільшуються кожного разу на 1 одиницю, коли на контакт «clock» приходять позитивний імпульс. При цьому на виходах з a-g

з'являється напруга, яка при подачі на 7-сегментний індикатор буде показувати кількість імпульсів. Контакт «reset» скидає покази підрахунку при замиканні на +. Контакт «Disable clock» також має бути сполучений на землю. Контакт «Enable display» (контакт 3) має бути підключений до плюса. Контакт «÷10» (контакт 5 – вихід) направляє сигнал про переповнення лічильника, щоб до нього можна було підключити аналогічний лічильник і почати відлік для 10, 100, 1000... Контакт «not 2» приймає значення LOW тоді і лише тоді, коли значення лічильника — 2. В останніх випадках — HIGH.

Робоча напруга живлення мікросхеми: 3—15 В, тобто вона має вбудований стабілізатор.

Електрична схема лічильника імпульсів пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів представлена на рисунку 2.12.

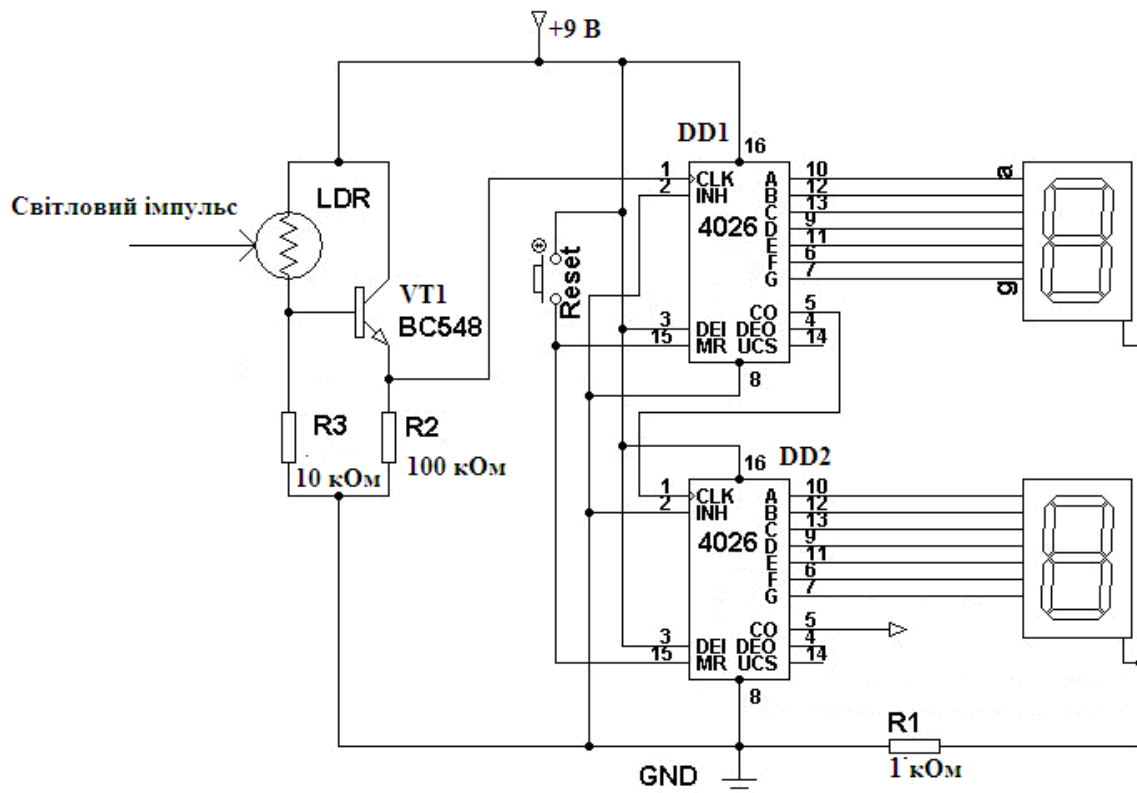


Рисунок 2.12 - Електрична схема лічильника імпульсів пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

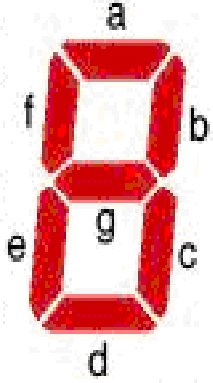
У схемі ведеться підрахунок світлових імпульсів зміни опору для фоторезистора. У якості фоторезистора можна застосувати фоторезистор 5516.

Отже, за рахунок зміни опору, зміщується і потенціал на базі транзистора. У результаті, починає протікає струм по ланцюгу колектор - емітер, а значить на вхід 1 мікросхеми подається імпульс, який і підлягає підрахунку.

Як тільки перша мікросхема відлічує 1 десяток, то на виводі 5 з'являється один імпульс про "переповнювання" лічильника. Цей імпульс подається на другу мікросхему, яка працює по точно такому ж принципу. Але в цьому випадку мікросхема вже рахує не одиниці, а десятки. Якщо ж додати 3 мікросхему, то це будуть сотні і т.д.

Для скидання на 0, досить подати плюс на ніжки 15 мікросхем. Мікросхема призначена для роботи з 7 сегментним індикатором. При подачі на один з виводів цього індикатора, ми отримуємо потрібну нам цифру. На рисунку 2.13 представлено таблицю показів 7-сегментного індикатора лічильника.

Outputs from the 4026 counter and display driver IC								
Count	a	b	c	d	e	f	g	h
0	●	●	●	●	●	●		●
1		●	●					●
2	●	●		●	●		●	●
3	●	●	●	●			●	●
4		●	●			●	●	●
5	●		●	●		●	●	
6	●		●	●	●	●	●	
7	●	●	●					
8	●	●	●	●	●	●	●	
9	●	●	●	●		●	●	



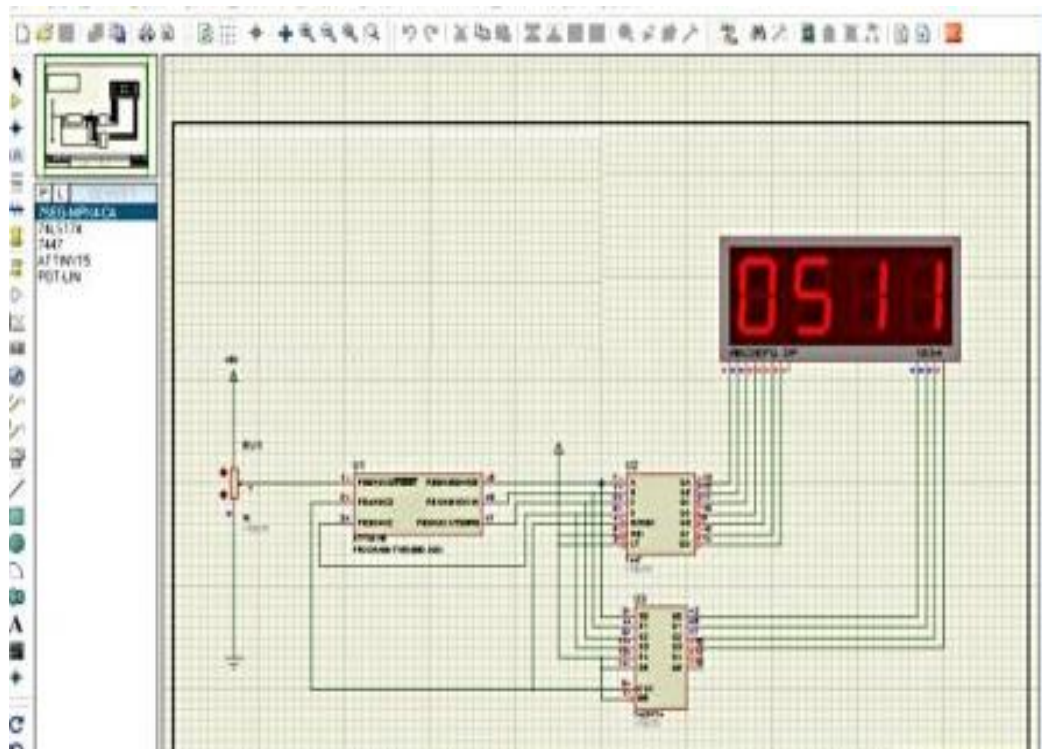
7-segment display

● = segment on. h is used to drive other counters.

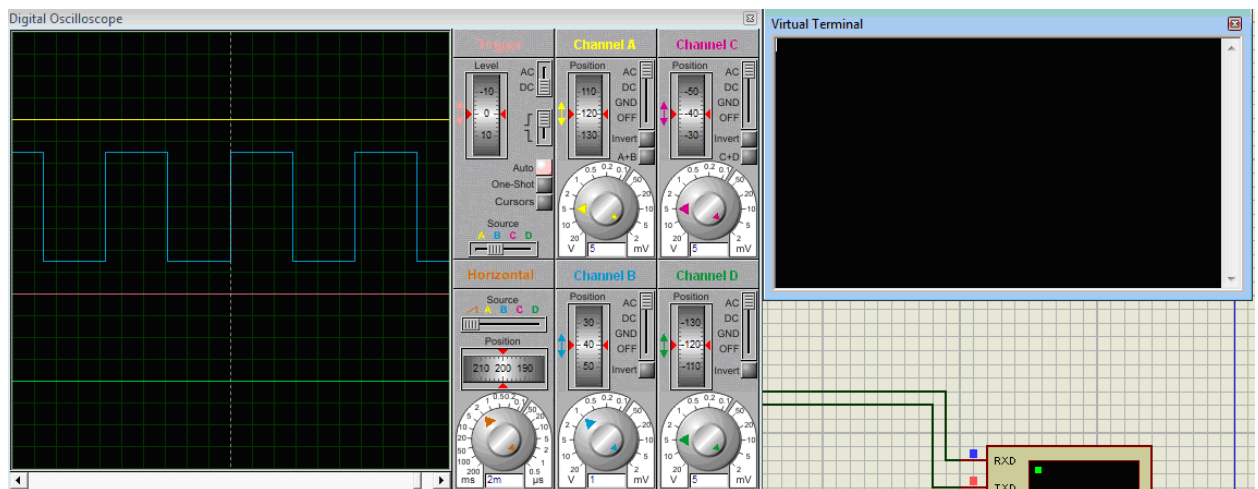
Рисунок 2.13 - Таблицю показів 7 - сегментного індикатора лічильника

Перевагами схеми є те, що вона не потребує налаштування.

Результати моделювання роботи лічильника представлені на рисунку 2.14.



а)



б)

Рисунок 2.14 – Моделювання роботи лічильника імпульсів пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів в редакторі Proteus: а – електрична схема; б) – покази осцилографа.

## 2.5 Інтерфейс з'єднання каналу реєстрації слабких оптичних сигналів із персональним комп'ютером (ПК)

Найбільш доступна і поширена з мікросхем – MAX232, що випускається багатьма виробниками. Типова схема включення з даних Texas Instruments наведена на рисунку 2.15 нижче [29-31]:

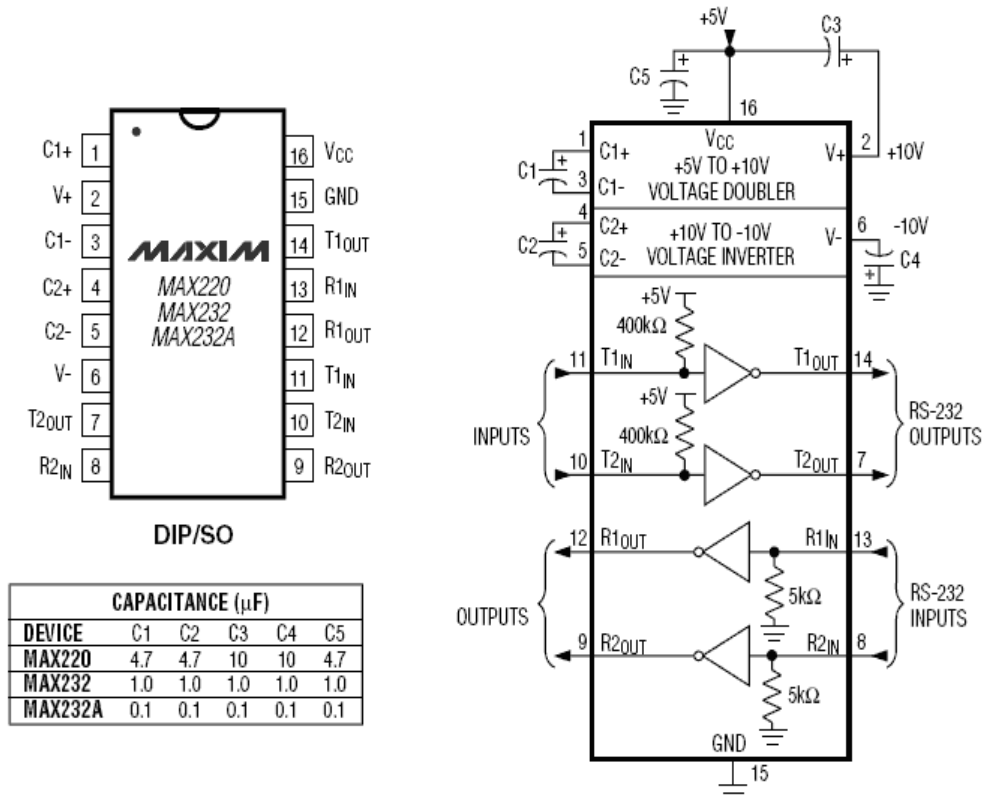


Рисунок 2.15 – Типова схема підключення перетворювача MAX232 фірми Texas Instruments

MAX232 – інтегральна схема, яка перетворює сигнали послідовного порту RS–232 у сигнали, придатні для використання в цифрових схемах на базі TTL або КМОП технологій. MAX232 працює прийомочередавачем і перетворює сигнали RX, TX, CTS і RTS. Функціональність і цоколівка мікросхеми стала стандартом і її аналоги випускаються безліччю виробників напівпровідників. Схема забезпечує рівень вихідної напруги, що використовується в RS–232 (приблизно  $\pm 7,5$  В), перетворюючи вхідну напругу + 5 В за допомогою внутрішнього зарядового перетворювача на зовнішніх конденсаторах. Це спрощує реалізацію RS–232 в пристроях, що працюють на напругах від 0 до + 5 В, так й не потрібно ускладнювати джерело живлення тільки для того, щоб використовувати RS–232. Приклад застосування аналогічного пе-

ретворювача інтерфейсу з використанням MAX203E у перемикаючому порту для обміну зібраними даними зображено на рисунку 2.16 [30].

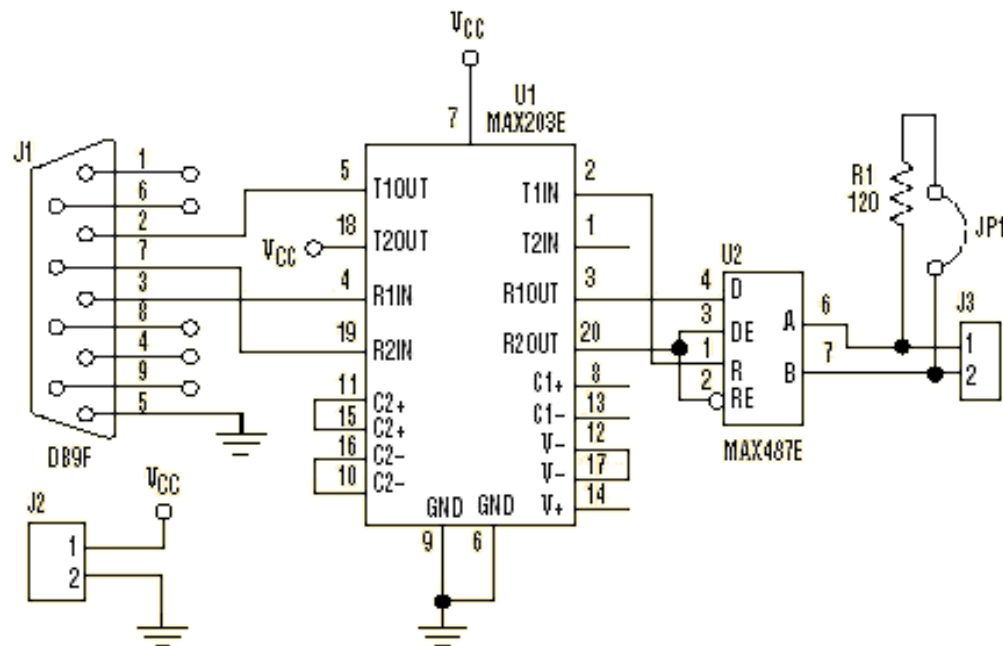


Рисунок 2.16 – Приклад перемикаючого порту між ПК та мережею RS-232

## 2.6 Розрахунок шумових ефектів системи реєстрації слабких оптичних сигналів

Важливим при реєстрації слабких оптичних сигналів є оцінка шумів, які виникають в процесі вимірювання. Вираз для відношення сигнал/шум  $\mu$  на виході фотоелектронного помножувача оптичного діапазону (для одного імпульсу) можна записати у вигляді [32]:

$$\mu = \frac{E_s(\lambda)}{\sqrt{E(\lambda) \left[ E_s(\lambda) + E_b^N(\lambda) + \frac{i_d + i_j}{2eB^*} E(\lambda) \right]}}, \quad (2.5)$$

де,  $E_s(\lambda)$  – енергія лазерного ехо-сигналу від аерозолі, що приходить на фотодетектор,  $E(\lambda)$  – енергія лазерного сигналу,  $E_b^N$  - енергія фонового випромінювання,  $i_d$  – середній темновий струм фотокатода ФЕП (струм витоку лавинного фотодіода),  $i_j$  – ефективний струм,  $e$  – заряд електрону,

$$B^* = \frac{BF_G}{\zeta_e}, \quad B = \frac{1}{\tau_d},$$

$F_G$  – параметр підсилення шуму,  $G$  – підсилення фотодетектора,  $\tau_d$  – час детектування.

На довжинах хвиль УФ діапазону розрахунки проводилися для модуля ФЕП H10720-20 [33] (з спектральною катодною чутливістю 100 мА/ Вт,  $\tau_d = 0,57$  нс.  $i_d = 1$  нА) і лавинного фотодіода S8664 - 20К [34] (із спектральною катодною чутливістю на довжині хвилі 0,355 мкм - 160 мА/ Вт.  $i_d \sim 1$  нА. Полоса 300 МГц).

На довжинах хвиль ІЧ діапазону розрахунки проводилися для охолодженого ФЕП Hamamatsu H10330A-75 [35] (з квантовою ефективністю фотокатода на довжині хвилі 1500 нм рівній 2% , що відповідає спектральній катодній чутливості 24 мА/ Вт.  $\tau_d = 1,6$  нс.  $i_d = 40$  нА) і лавинного фотодіода G8931-20 [36] (із спектральною чутливістю на довжині хвилі 1550 нм – 900 мА/ Вт.  $i_d = 150$  нА. Смуга 300 МГц).

Результати розрахунків відношення сигнал-шум  $\mu$  від відстані  $z$  представлені на рисунках 2.17 – 2.20 для довжин хвиль випромінювання 0,355 мкм і 1,54 мкм в двох випадках – коли фотодетектором служить ФЕП і лавинний фотодіод.

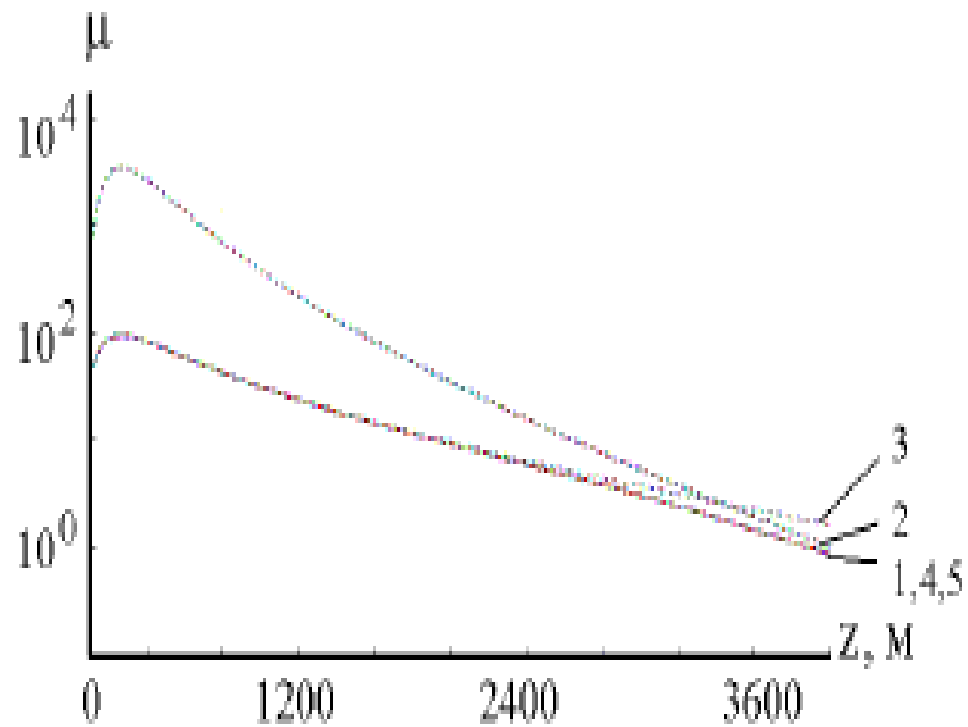


Рисунок 2.17 – Залежність відношенні сигнал/шум від відстані  $z$  для ФЕП Н10720-20 (довжина хвилі зондування 0,355 мкм): 1 – результат розрахунків при обліку всіх шумів, 2 - при обліку всіх шумів, але без шуму дробу, викликаного самим сигналом; 3 - при обліку всіх шумів, але без шуму дробу, викликаного фоновим (із-за розсіяння сонячного світла на атмосферному аерозолі) випромінюванням; 4 - при обліку всіх шумів, але без врахування темнового струму фотодетектора; 5 - при обліку всіх шумів, але без врахування теплового шуму, пов'язаного з еквівалентним опором навантаження вихідного ланцюга



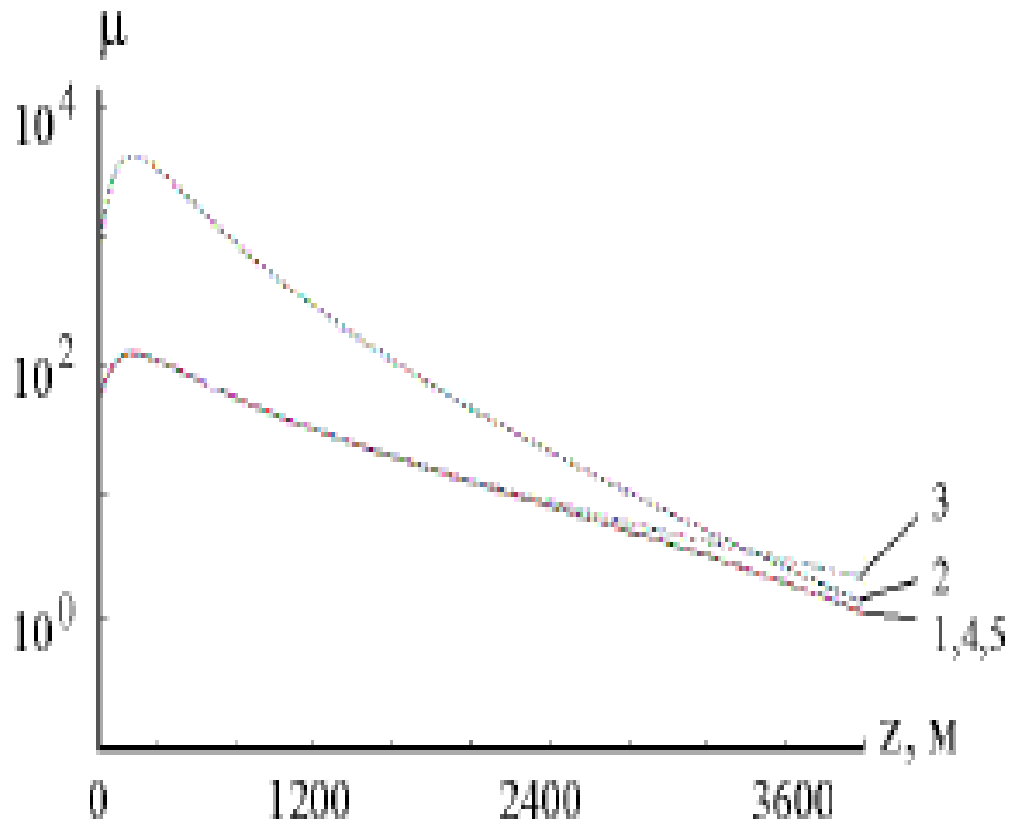


Рисунок 2.18 – Залежність відношенні сигнал/шум від відстані  $z$  для лавинного фотодіода S8664 - 20К (довжина хвилі зондування 0,355 мкм): 1 – результат розрахунків при обліку всіх шумів, 2 - при обліку всіх шумів, але без шуму дробу, викликаного самим сигналом; 3 - при обліку всіх шумів, але без шуму дробу, викликаного фоновим (із-за розсіяння сонячного світла на атмосферному аерозолі) випромінюванням; 4 - при обліку всіх шумів, але без врахування темного струму фотодетектора; 5 - при обліку всіх шумів, але без врахування теплового шуму, пов'язаного з еквівалентним опором навантаження вихідного ланцюга

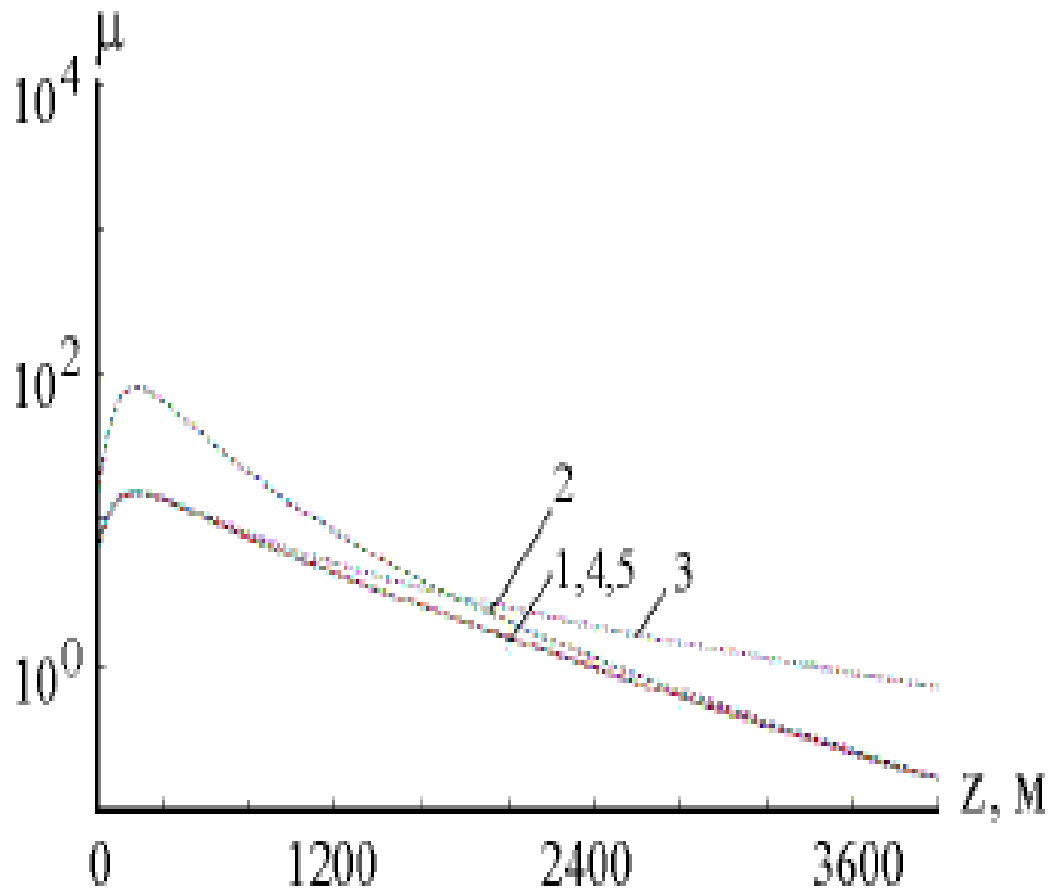


Рисунок 2.19 – Залежність відношенні сигнал/шум від відстані  $z$  для ФЕП Н10330А-75 (довжина хвилі зондування 1,54 мкм): 1 – результат розрахунків при обліку всіх шумів, 2 - при обліку всіх шумів, але без шуму дробу, викликаного самим сигналом; 3 - при обліку всіх шумів, але без шуму дробу, викликаного фоновим (із-за розсіяння сонячного світла на атмосферному аерозолі) випромінюванням; 4 - при обліку всіх шумів, але без врахування темного струму фотодетектора; 5 - при обліку всіх шумів, але без врахування теплового шуму, пов'язаного з еквівалентним опором навантаження вихідного ланцюга

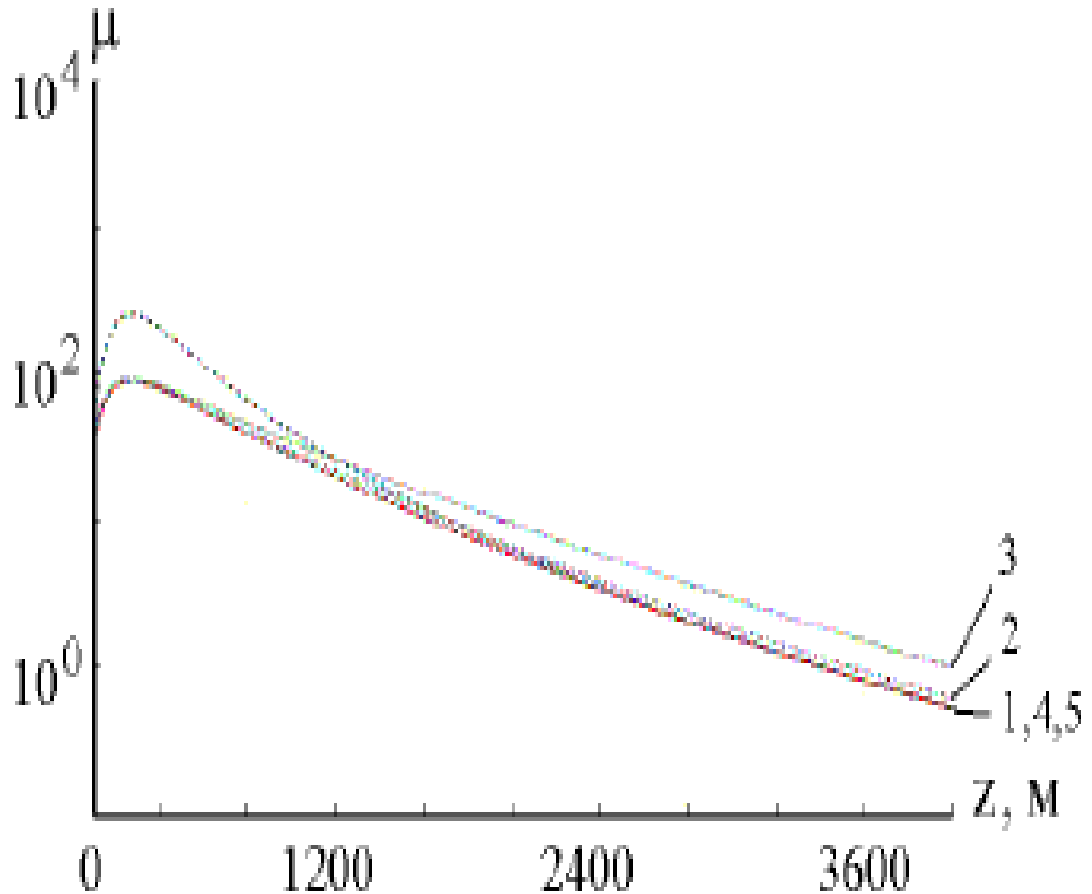


Рисунок 2.20 – Залежність відношенні сигнал/шум від відстані  $z$  для лавинного фотодіода G8931-20 (довжина хвилі зондування 1,54 мкм): 1 – результат розрахунків при обліку всіх шумів, 2 - при обліку всіх шумів, але без шуму дробу, викликаного самим сигналом; 3 - при обліку всіх шумів, але без шуму дробу, викликаного фоновим (із-за розсіювання сонячного світла на атмосферному аерозолі) випромінюванням; 4 - при обліку всіх шумів, але без врахування темного струму фотодетектора; 5 - при обліку всіх шумів, але без врахування теплового шуму, пов'язаного з еквівалентним опором навантаження вихідного ланцюга

В даний час для реалізації квантового каналу в системах передачі інформації найбільш придатним середовищем є оптичне волокно, властивості якого дозволяють передавати інформацію на відстані до 100 км. Але використання волокна накладає обмеження на можливість роботи з поляри-

заційним кодуванням, оскільки оптоволокно має відчутні флуктуації двопротоменезаломлення. Як детектори одиничних фотонів в системах квантової криптографії використовуються лавинні фотодіоди. Вони є найбільш досконалыми фотоприймачами для виявлення оптичних сигналів в волоконнооптичних системах передачі .

Такі системи працюють переважно в двох спектральних діапазонах: 0,8–0,9 і 1–1,6 мкм.

У першому діапазоні оптимальним є кремнієвий лавинний фотодіод: він перевершує фотоприймачі на інших матеріалах за надійністю, електричними характеристиками, відпрацьованістю технології та дешевизною. У спектральному діапазоні 1–1,6 мкм на даний час практично використовуються германієвий і InGaAs лавинні фотодіоди[37].

Таким чином, можна зазначити, що для отримання малого шуму в лавинних фотодіодах потрібно звести до мінімуму ефект зворотного зв'язку в процесі множення. Для цього необхідно, щоб коефіцієнти ударної іонізації електронів і дірок сильно розрізнялися за величиною, і щоб процес множення ініціювався носіями з більш високим коефіцієнтом ударної іонізації [37].

Результати експерименту показують, що InGaAs/InP лавинний фотодіод в режимі очікування показує більш низький шум, ніж германієвий лавинний фотодіод. Більш того, це розходження збільшується зі збільшенням квантової ефективності детектування. Оскільки криві не паралельні, то вони можуть перетнутися при низьких значеннях квантової ефективності, і може статися, що Ge лавинний фотодіод буде давати більш низький шум, ніж InGaAs/InP (рисунок 2.21) [37].

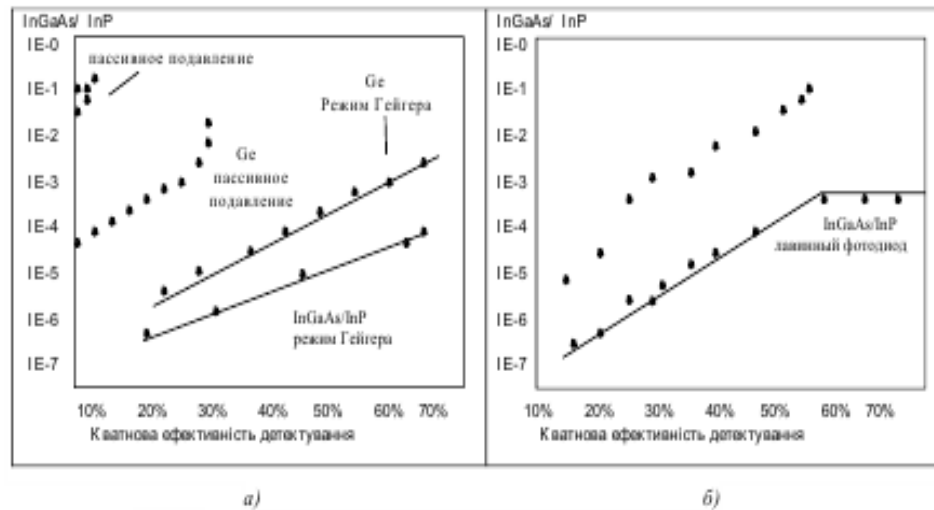


Рисунок 2.21 - Залежність ймовірності темного відліку в імпульсі, який зміщується від квантової ефективності детектування 1,3 мкм фотонів: а) при 77 К в режимі Гейгера; б) при температурі 123 К

За таких умов фотон світла не може бути просто продетектований. Більше того, оскільки у випадку низьких квантових ефективностей детектування число спрацьовувань знижується, необхідно записувати темнові відліки протягом дуже довгого часу (~1 година), щоб досягти найменшої невизначеності.

Для порівняння роботи двох лавинних фотодіодів, також наведемо результати експерименту, коли обидва фотодіода були включені в схему з пасивним придушенням лавини (47 кОм). У цьому випадку система працювала так, що реєструвалися тільки лавини, що виникли при збігу імпульсу з лазера і синхронізуючого сигналу від генератора, який управляє послідовно фотонів на лавинний фотодіод. Робота діодів в цьому режимі не знизилася рівень шуму в порівнянні з роботою в режимі Гейгера. Більш того, Ge і InGaAs/InP фотодіоди «помінялися» місцями. При високій температурі (приблизно 123 К) вигідніше використовувати InGaAs/InP лавинний фотодіод, ніж германієвий.

При високих коефіцієнтах ефективності детектування ймовірність темного відліку InGaAs/InP фотодіода майже стабілізується і навіть, як

видно, злегка знижується. Можна зробити висновок, що InGaAs/InP лавинні фотодіоди припускають можливість поліпшення співвідношення сигнал/шум при детектуванні одиничного фотона.

Проте їх властивості погіршені ефектом афтерпалсінга, який особливо важливий при низьких температурах [37].

Порівняння показує, що використання лавинних фотодіодів у якості реєструючих приладів є більш привабливим. У подальших розробках пропонується замінити ФЕП на лавинні фотодіоди.

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) в роботі пропонується розвести оптичні канали реєстрації оптичних сигналів для УФ та ІЧ випромінювання кожен окремо із пристроями реєстрації та обробки сигналів;

2) в систему обробки сигналів пропонується об'єднати лічильник світлових імпульсів, АЦП та інтерфейс з'єднання із ПК;

3) із аналізу кривих пропускання напівпровідників ZnO, легованих Ga в залежності від концентрації домішок, видно, що найбільш вигідним для використання у якості реєструючого елемента для ІЧ випромінювання пропонується використати напівпровідники ZnO, леговані Ga з вмістом 2,5 ат.%;

4) для каналу реєстрації ІЧ випромінювання в роботі рекомендовано ФЕП Н10720-20. Для ФЕП Н10720-20 розроблено нове високовольтне імпульсне джерело живлення;

5) для оцінки енергії фотонів, які пройшли каналом реєстрації у роботі пропонується використати лічильник на мікросхемі CD4026, яка дає можливість звести до мінімуму супутні елементи навантаження і те, що вона не потребує додаткового налаштування;

6) у якості інтерфейсу з'єднання каналу реєстрації слабких оптичних сигналів із персональним комп'ютером (ПК) пропонується використати мікросхему MAX232 фірми Texas Instruments, яка перетворює сигнали послідовного порту RS-232 у сигнали придатні для використання в цифрових схемах на базі TTL або КМОП технологій;

7) аналіз шумових процесів показав, що використання лавинних фотодіодів у якості реєструючих приладів є більш привабливим. У подальших розробках пропонується замінити ФЕП на лавинні фотодіоди.

8) у результаті моделювання роботи функціональних блоків в редакторі Proteus було показано, що параметри пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів задовольняють вимогам, поставленим у завданні до роботи.

### 3 Техніко-економічне обґрунтування розробки пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

З точки зору економічної ефективності, наукові дослідження методів реєстрації слабких оптичних сигналів сприятимуть розвитку пристроїв зв'язку, обладнання передачі інформації, автоматизованих інформаційних систем.

#### 3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення пристрою

Топологічний аналіз показує, що пристрій може бути реалізований у вигляді малогабаритного приладу і виконаний за сучасною маловитратною технологією печатних плат на фольгованому текстоліті. Ця технологія передбачає, що всі елементи будуть навісними, а напиленням на підкладці, або травленням поверхні створюється лише струмопровідний шар. Для вибору технології виготовлення схеми реєстратора проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (табл. 3.1), враховуючи шкалу відносної важливості (табл. 3.2) [38].

*Таблиця 3.1 - Можливі варіанти технологій виробництва пристрою*

Технологія		Короткий опис
А	Технологія печатних плат на фольгованому текстоліті	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано травленням фольгованого текстоліту.
В	Товстоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та міжелементні з'єднання виконані у вигляді товстих композитних плівок.
С	Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та міжелементні з'єднання виконані у вигляді тонких плівок провідних та резистивних матеріалів.
	Тонкоплівкових гібридних мікробірок	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано



D	у вигляді тонких плівок.
---	--------------------------

**Таблиця 3.2 - Шкала відносної важливості**

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

*Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3.*

*Встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв (табл. 3.3) [38].*

У матриці прийняті наступні позначення:  $i$  – номер критерію; при порівнянні 6-ох критеріїв (табл. 3.3)  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ;  $X_i$  - локальний пріоритет, тобто відносна вага  $i$ -го критерію в глобальному критерії:

**Таблиця 3.3 – Попарне порівняння критеріїв**

Критерій	1	2	3	4	5	6	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^6 \omega_i}$	$X_i$
1. Швидкодія	1	1/3	3	1/7	1/5	3	0,664	0,073
2. Завадостійкість	3	1	3	1/3	1/7	3	1,042	0,116
3. Споживання	1/3	1/3	1	1/5	1/7	3	0,460	0,051
4. Площа	7	3	5	1	1/5	7	2,297	0,254
5. Сумісність	5	7	7	5	1	5	4,277	0,473
6. Вартість	1/3	1/5	1/3	1/7	1/5	1	0,293	0,033
	$\Sigma$						9,033	1,00

*Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (табл. 3.4 - 3.9). Оскільки тепер порівнюються 4 технології по одному критерію, то  $i = 1, 2, 3, 4$ .*

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}}{\sum_{i=1}^4 \sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}},$$

де  $\sum$  - сума по стовпці  $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$ .

**Таблиця 3.4 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «швидкодія»**

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	3	1/5	1	3	1,16	0,19
B	5	1	7	7	3,96	0,65
C	1/3	1/7	1	1/2	0,39	0,07
D	1/3	1/7	2	1	0,56	0,09
$\Sigma$					6,07	1,00

**Таблиця 3.5 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «завадостійкість»**

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	1	5	1	1/3	1,14	0,21
B	1/5	1	1/5	1/7	0,48	0,09
C	1	5	1	1/3	1,56	0,29
D	3	7	3	1	2,20	0,41
$\Sigma$					5,37	1,00

**Таблиця 3.6 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «споживання»**

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	$X_i$
A	1	5	1/5	1/7	0,61	0,09
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/3	1,85	0,29
D	7	9	3	1	3,71	0,58
$\Sigma$					6,41	1,00

**Таблиця 3.7 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «площа»**

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	3	5	0,99	0,21
B	1/5	1	1/3	1/2	0,24	0,05
C	1/3	3	1	3	2,03	0,43
D	1/5	2	1/3	1	1,47	0,31
Σ					4,73	1,00

**Таблиця 3.8 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «сумісність»**

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	5	1/3	1/5	0,76	0,13
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/2	2,41	0,41
D	3	9	2	1	2,47	0,42
Σ					5,88	1,00

**Таблиця 3.9 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»**

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^4 \omega_i}$	X <sub>i</sub>
A	1	3	5	6	3,08	0,56
B	1/3	1	3	4	1,41	0,26
C	1/5	1/3	1	2	0,60	0,11
D	1/6	1/4	1/2	1	0,38	0,07
Σ					5,47	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт (табл. 3.10) [38].

З порівняння глобальних пріоритетів різних технологій видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта реалізації пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів з використанням технології печатних плат на фольгованому текстоліті.

Таблиця 3.10 - Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Глобальний
Вага	0,073	0,116	0,051	0,254	0,473	0,033	
Печатних плат на фольгованому текстоліті	0,07	0,29	0,29	0,43	0,41	0,11	0,360
Товстоплівкових гібридних інтегральних схем	0,65	0,09	0,04	0,05	0,04	0,26	0,100
Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	0,19	0,21	0,09	0,21	0,13	0,56	0,176
Тонкоплівкових гібридних мікрозбірок	0,09	0,41	0,58	0,31	0,42	0,07	0,364

За допомогою методу аналізу ієрархій проведене порівняння чотирьох типів технологій реалізації пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів за наступними критеріями: 1) швидкодія; 2) завадостійкість; 3) споживана потужність; 4) площа, займана на кристалі; 5) сумісність; 6) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «сумісність» (табл. 3.3). За даними таблиці 3.9 локальний пріоритет за критерієм «вартість» є найвищим для технології печатних плат на фольгованому текстоліті. Проте найбільший глобальний пріоритет мають технологія тонкоплівкових гібридних мікрозбірок та печатних плат на фольгованому текстоліті. Саме технологія печатних плат на фольгованому текстоліті й буде використовуватися для виготовлення пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів.

### 3.2 Розрахунок витрат на виробництво пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

Витрати на матеріали і напівфабрикати вказані в таблицях 3.11, 3.12.

Витрати на матеріали і напівфабрикати склали 266,90 грн.

Таблиця 3.11 – Розрахунок вартості матеріалів на виробництво пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів

Матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Усього витрат грн.
Транзистор BC547	шт.	4	1	4
Резонатор 8 МГц	шт.	1	6	6
Діод 1N4148	шт.	4	0.5	2
Конденсатор 100 нФ	шт.	1	1	1
Конденсатор 22 пФ	шт.	2	1	2
Резистор 5.6 кОм 0.125 Вт	шт.	4	0.2	0.8
Резистор 10 кОм 0.125 Вт	шт.	2	0.2	0.4
Реле SRD-05VDC-SL-C	шт.	4	18	72
Штирьове гніздо	шт.	28	0.23	6.5
Кнопка тактова 12x12	шт.	5	2.2	11
Стабілізатор LD1117S33CTR	шт.	1	3.3	3.3
Дисплей Nokia LCD 5110	шт.	1	75	75
Мікросхема MAX203E	шт.	1	35	35
Мікросхема MAX487E	шт.	1	29	29
Всього				248

Таблиця 3.12 – Розрахунок вартості напівфабрикатів

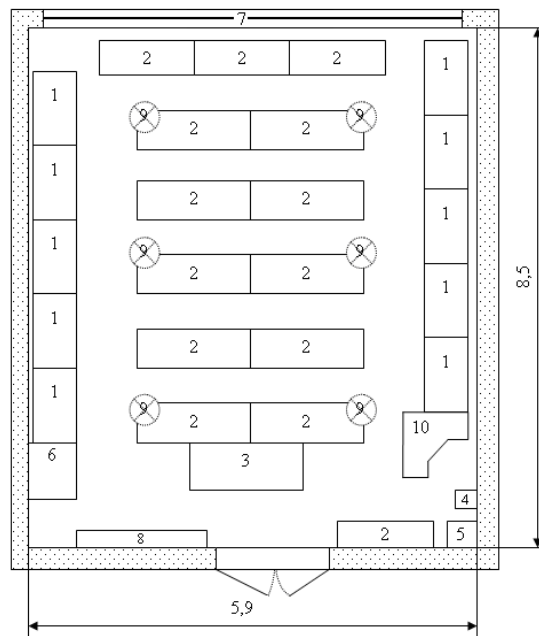
Матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Усього витрат грн.
-----------	----------------	-----------	-----------------------	--------------------

Фольгований текстоліт 70 × 80 мм	шт.	1	8.00	8.00
Травильник	уп.	1	4.90	4.90
Графарет	шт.	1	6	6
Усього				18.90

## 4 Охорона праці та техногенна безпека

### 4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При виконанні дипломної роботи комп'ютерне моделювання та розрахунок пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів проводилися в приміщенні кафедри МЕІС, макет якої представлено на рисунку 4.1 [39].



1 - стіл комп'ютерний; 2 - стіл аудиторний; 3 - стіл викладача; 4 - автомат відключення електричного живлення; 5 - шафа силова; 6 - шафа універ-

сальна; 7 - вікно; 8 - дошка аудиторна; 9 - світильник 4-х ріжковий; 10 - стіл адміністратора мережі

Рисунок 4.1 – Макет приміщення в якому проводилися роботи

Площа приміщення складає  $50,15 \text{ м}^2$ ; об'єм  $175,52 \text{ м}^3$ ; довжина приміщення  $8,5 \text{ м}$ ; ширина приміщення  $5,9 \text{ м}$ ; висота приміщення  $3,5 \text{ м}$ ; число вікон 1; число робочих місць 10; освітлення: природне (через бічне вікно) і загальне штучне. Параметри приміщення задовольняють нормативним значенням: площа  $6 \text{ м}^2$ , об'єм  $20 \text{ м}^3$  на одного працюючого.

Лабораторія є приміщенням легкої категорії (виконуються легкі фізичні роботи), тому повинні дотримуватися такі вимоги (період року – холодний):

- оптимальна температура повітря  $22 \dots 24 \text{ }^\circ\text{C}$  (допустима  $20 \dots 24 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- оптимальна відносна вологість  $40 \dots 60\%$  (допустима не більше  $75\%$ );
- швидкість руху повітря не більше  $0,1 \text{ м/с}$ .

Аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок, що умови праці в лабораторії характеризуються наявністю нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

На ділянці проведення експерименту значна частина моделювання вироблялася на персональному комп'ютері IBM PC і макетному стенді, оснащеному блоками живлення, програмованими пристроями вхідних дій, реєструючим і вимірювальним устаткуванням. Печатні плати виготовлялися за технологією травлення фольгованого текстоліту на спеціальному стенді з витяжною шафою, розташованому в науково-дослідній лабораторії кафедри.

Тривала робота перед екраном монітора наводить до різних функціональних розладів організму, навантаження на очі. Захворювання поступово накопичуються. В основному страждають кисті, зап'ястя, плечі, шийна область.

#### 4.2 Заходи з поліпшення умов праці

При проведенні моделювання схеми пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів, якість експерименту багато в чому залежить від освітлення, тому в лабораторії має бути передбачене штучне освітлення [40].

Незадовільне освітлення може спотворити інформацію, крім того, викликає стомлення організму в цілому. Неправильне освітлення може з'явитися причиною травматизму.

Залежно від класу приміщення по вибухонебезпеці і від чистоти середовища виробничих приміщень, визначається схема розташування світильників, їх марка і конструктивне виконання [40].

Для освітленості приміщення з розмірами  $A = 8,5$  м,  $B = 5,9$  м та висотою  $H = 3,5$  м використовуються 6 світильників з чотирма лампами розжарювання. Коефіцієнти віддзеркалення світлового потоку від стелі, стін і підлоги відповідно рівні  $p_{\text{стелі}} = 70\%$ ,  $p_{\text{стін}} = 50\%$ ,  $p_{\text{підл.}} = 10\%$ . Затінювання робочих місць немає. Висота світильника  $h_c = 0,9$  м, висота робочої поверхні над рівнем підлоги  $h_c = 0,8$  м. Нормативна величина освітленості робочих місць з відео-терміналами складає  $E_n = 300 \dots 500$  лк. В даному приміщенні освітленість 350 ... 500 лк.

При монтажі компонентів на плату і формуванні топологічного рисунка струмопровідного шару виникає потенційна небезпека небажаної дії на організм речовин матеріалів, що утворюються в технологічному процесі. Всі речовини, що забруднюють повітря, надають шкідливу дію, якщо вони потрапляють в організм в кількостях, що перевищують деяку порогову величину. У виробництві плат застосовують певні речовини, які шкідливі для організму. Клас небезпеки шкідливих речовин встановлюється залежно від гранично допустимої концентрації речовин в повітрі робочої зони. Це та концентрація яка переноситься без відхилень від нормального стану в перебігу робочого дня при щоденному диханні. Згідно ДСП 173-96 встановлюють чотири класи шкідливих речовин: 1-й клас – речовини надзвичайно небезпечні; 2-й клас – речовини високо небезпечні; 3-й клас – речовини помірно небезпе-



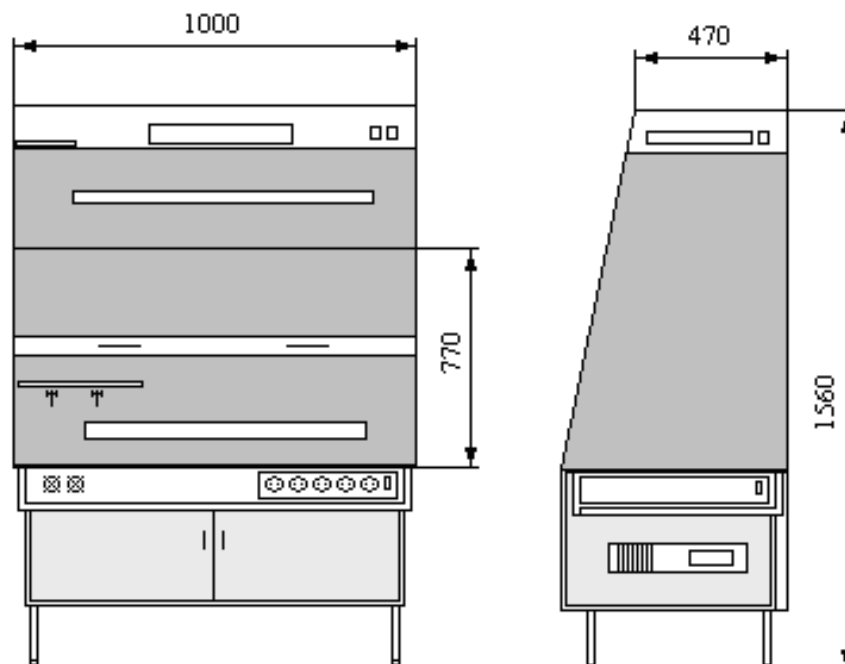
чні; 4-й клас – речовини мало небезпечні. Дія токсичних речовин виявляється в гострих і хронічних отруєннях.

При монтажі електронних плат застосовують ацетон, етиловий спирт для знежирення і очищення від пилю мікросхеми, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати. Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нервово - психічні захворювання.

Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

Основні засоби техніки безпеки – герметизація апаратури і устаткування, наявність припливної витяжної вентиляції в приміщенні проведення робіт і витяжна шафа для виготовлення печатних плат і монтажу компонентів паянням (рис. 4.2).

Витяжна шафа оснащена вентилятором моделі CE 140L-125. Вентилятор має крильчатку із заломленими вперед лопатками і двигун із зовнішнім ротором. Корпус виготовлений з листової сталі, що гальванізується. Для захисту двигуна від перегріву вентилятор оснащений вбудованими термоконтактами з ручним перезапуском.



## Рисунок 4.2 – Витяжна шафа для виготовлення печатних плат

## 4.3 Виробнича санітарія

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відео терміналах і персональних комп'ютерах є допоміжною, температура, відносна вологість і швидкість руху повітря на робочих місцях повинні відповідати діючим санітарним нормам мікроклімату виробничих приміщень [40].

У виробничих приміщеннях, в яких робота на відео терміналах і персональних комп'ютерах є основною, повинні забезпечуватися оптимальні параметри мікроклімату відповідно до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Оптимальні норми мікроклімату для приміщень з відео-терміналами і персональними комп'ютерами

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С (не більше)	Відносна вологість повітря %	Швидкість руху повітря м/с
Холодний	Легка – 1а	22-24	40-60	0.1
Теплий	Легка – 1а	23-25	40-60	0.1

До категорії 1а відносяться роботи, які виконуються сидячи і що не вимагають фізичної напруги, при яких витрата енергії складає до 120 ккал/ч. До категорії 1б відносяться роботи, які виконуються сидячи, стоячи або пов'язані з ходьбою і такі, що супроводжуються деякою фізичною напругою, при яких витрата енергії складає від 120 до 150 ккал/год.

У приміщенні проведення експерименту підтримується мікроклімат відповідний нормативам, для категорії робіт «Легка – 1а»

Ергономічне розташування робочого міста за персональним комп'ютером оцінюється вимогами:

- до візуальних параметрів засобів відображення інформації індивідуального користування;

- до емісійних параметрів ПК - параметрів випромінювань дисплеїв, системних блоків, джерел живлення, зокрема безаварійного, і ін.

Робота з дисплеями при неправильному виборі яскравості і освітленості екрану, контрастності, кольорів знаків і фону, за наявності відблисків на екрані, тремтіння і мигтіння зображення - приводить до зорового стомлення, головних болів, до значного фізіологічного і психічного навантаження, до погіршення зору.

Візуальні параметри і світловий клімат визначають зоровий дискомфорт, який може виявлятися при використанні будь-яких типів екранів дисплеїв, - на електронно-променевих трубках, рідкокристалічних, газорозрядних, електролюмінесценціях панелях або на інших фізичних принципах.

#### 4.4 Електробезпека

Для забезпечення захисту від поразки електричним струмом у використовуваних електроустановках повинні застосовуватися технічні способи і засоби захисту.

Приміщення за ступенем небезпеки ураження людей електричним струмом являється приміщенням без підвищеної небезпеки. Приміщення сухе, добре опалюване з струмонепровідною підлогою, з температурою 18-24 °С, з вологістю 40...50%. З електроустаткування в ньому знаходяться відео термінальні пристрої та учбові стенди, які знаходяться під напругою  $U = 220 \text{ В}$ , частотою  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Вибір того або іншого способу або засобу захисту (або їх поєднань) в конкретному електроприладі, і ефективність його вживання залежать від цілого ряду чинників, у тому числі від:

- номінальної напруги;
- роду, форми і частоти струму використовуваного приладу;

- способу електропостачання (від стаціонарної мережі, від автономного джерела живлення електроенергією);
- вигляду виконання (стаціонарні, пересувні, переносні);
- умов зовнішнього середовища;
- схеми можливого включення людини в ланцюг протікання струму (прямий однофазний, прямий двофазний дотик; включення під напругу кроку);
- вигляду робіт (монтаж, наладка, випробування) і ін.

Основними технічними засобами захисту є:

- захисне заземлення;
- автоматичне відключення живлення (занулення);
- пристрої захисного відключення;
- ізоляція струмопровідних частин.

Принцип роботи ПЗВ (рис. 4.3) полягає в тому, що воно постійно контролює вхідний сигнал і порівнює його з наперед заданою величиною. Якщо вхідний сигнал перевищує встановлене значення, то пристрій спрацьовує і відключає захищену електроустановку від мережі. Як вхідні сигнали пристроїв захисного відключення використовують різні параметри електричних мереж, які несуть в собі інформацію про умови поразки людини електричним струмом.

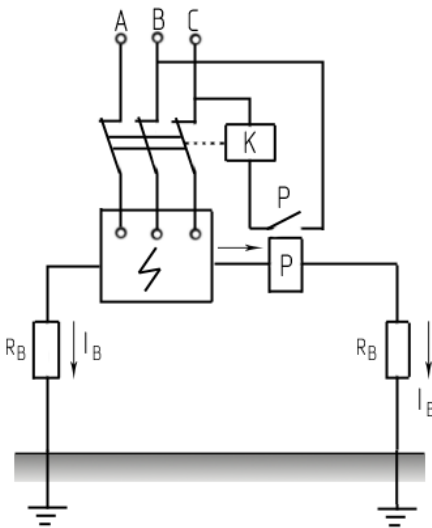


Рисунок 4.3 - Проста схема пристрою захисного відключення

Основними елементами будь-якого пристрою захисного відключення є датчик, перетворювач і виконавчий орган.

Основними параметрами, по яких підбирається те або інші ПЗВ є: номінальний струм навантаження, тобто робочий струм електроустановки, який протікає через нормально замкнуті контакти ПЗВ в черговому режимі; номінальна напруга; встановлене значення напруги; час спрацьовування пристрою [40].

#### 4.5 Пожежна безпека. Техногенна безпека

Виробництво напівпровідникових приладів, згідно ДБН В.1.1–7–2002, відноситься до категорії Б, оскільки це виробництво зв'язане із застосуванням речовин спирту і ацетону з температурою спалаху пари від 28 до 60°C горючих газів. Для зниження пожежної небезпеки використовують обмежену кількість матеріалів які обертаються в процесі, зберігаються, здатні горіти.

Характерними причинами виникнення пожеж в лабораторії є необережне поводження з вогнем, порушення технологічних процесів, неправильні електропроводки і устаткування, неправильне користування електричними приладами і ін. Для лабораторії встановлена категорія пожежної небезпеки В.

Основні будівельні конструкції будівлі, в якій знаходиться ділянка, виконані з тих, що не згорають і важко згорають матеріалів, що цегельних і виштукатурюють. Отже, вогнестійкість будівлі має 2 рівень. Для евакуації людей на випадок пожежі, згідно ДБН В.1.1–7–2002, в лабораторії є два евакуаційні виходи, розташованих в протилежних кінцях приміщення ділянки. Ширина дверей і сходів рівна 1,6 м, що відповідає нормі.

Відстань від найбільш видаленого робочого місця до найближчого виходу – 15 м. Швидкість пересування людей при евакуації – 16 м/хв [40].

Згідно правилами влаштування електроустановок ПВЕ, будівля, в якій знаходиться ділянка по заходах захисту від блискавок, відноситься до категорії 3 і захищається від прямих ударів блискавок, і від замету високих потенціалів через землю, тобто підземні металеві комунікації приєднуються при

введенні в об'єкт, що захищається, до заземлювачів електроустаткування. Отже, грозозахист заснований на стержневих громовідводах.

Для попередження пожеж на ділянці необхідно створити строгий протипожежний режим. Створюється загально об'єктова і лабораторна інструкція по ПБ, проводиться первинний протипожежний інструктаж на робочому місці; створюється план протипожежних заходів і евакуації людей на випадок пожежі.

Як вогнегасні речовини можна застосовувати воду, вуглекислоту, хімічну і повітряно-механічну піну. Для гасіння вогнищ усередині будівлі на майданчиках сходових кліток, в коридорах і отворі встановлюють пожежні крани, які розміщені в шафах, де знаходиться і рукав з протипожежним стволом. Для гасіння пожеж електроустановок використовується вуглекислий вогнегасник ОУ-2, в кількості двох вогнегасників на приміщення. Існують пожежна електрична сигналізація, яка забезпечує прямий зв'язок пожежної охорони з охоронним об'єктом. У даній будівлі застосовують звукову систему сигналізації. При появі сигналу сповіщення про пожежу співробітники лабораторії № 216 організовано без паніки покидають лабораторію і, залежно від місця спалаху, слідує або вліво через лабораторний корпус для виходу на вулицю Добролюбова, або управо для виходу на вулицю 40 років Радянської України (рис. 4.4).

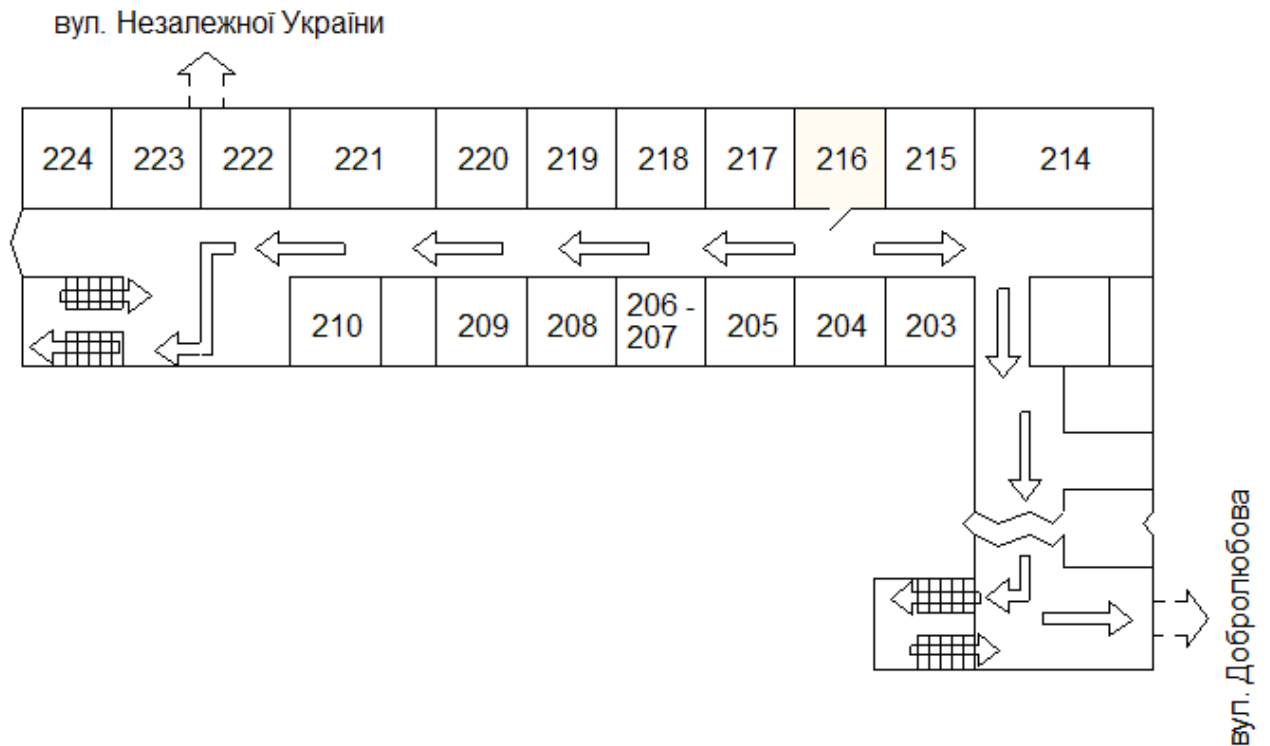


Рисунок 4.4 – План евакуації при пожежі із аудиторії № 216

#### 4.6 Розрахунок захисного заземлення

Заземленню підлягають вимірювальні установки, напруга живлення яких 220 В. У якості заземлювача візьмемо сталеві вертикальні стержні довжиною  $l = 2.5$  м, діаметром  $d = 0.04$  м, діаметр сполучної смуги  $b = 0.04$  м. Контур заземлення розташовано на горизонтальному майданчику біля корпусу академії. Ґрунт – суглинок.

Допустимий опір заземлюючого пристрою ( $R_n$ ) дорівнює 4 Ом [41]. Визначимо питомий електричний опір ґрунту (суглинку),  $\rho$  якого дорівнює 100 Ом·м [41].

Розрахуємо опір розтікання струму одного вертикального стержня:

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{4 \cdot l}{d} = \frac{100}{2 \cdot 3.14 \cdot 2.5} \ln \frac{4 \cdot 2.5}{0.04} = 35.1 \text{ Ом} \quad (4.1)$$

Прийmemo число заземлювачів:

$$n = \frac{R_l}{R_n} = \frac{35.1}{4} = 8.775 \approx 9 \quad (4.2)$$

Визначимо довжину горизонтальної смуги (по контуру):

$$l_z = a \cdot n \quad (4.3)$$

де  $a$  – відстань між вертикальними електродами ( $a = 2$  м)

$$l_z = 2 \cdot 9 = 18 \text{ м} \quad (4.4)$$

Опір горизонтальної смуги:

$$R_{2c} = \frac{\rho}{\pi \cdot l_z} \cdot \frac{4 \cdot l_z}{b} = \frac{100}{3.14 \cdot 18} \cdot \ln \frac{4 \cdot 18}{0.04} = 13.2 \text{ Ом} \quad (4.5)$$

Коефіцієнт екранування для вертикального заземлювача [41]:

$$\eta_e = \frac{0.68 + 0.56}{2} = 0.62 \quad (4.6)$$

і для горизонтальної смуги

$$\eta_z = \frac{0.34 + 0.4}{2} = 0.37 \quad (4.7)$$

Опір групи вертикальних заземлювачів:

$$R_{zp} = \frac{R_{ez}}{n \cdot \eta_e} = \frac{35.1}{9 \cdot 0.62} = 6.3 \text{ Ом} \quad (4.8)$$

Опір горизонтальної смуги з врахуванням екранування:

$$R_z = \frac{R_{2c}}{\eta_z} = \frac{13.2}{0.37} = 35.6 \text{ Ом} \quad (4.9)$$

Опір заземлювача в цілому:

$$R_3 = \frac{R_{zp} \cdot R_z}{R_{zp} + R_z} = \frac{6.3 \cdot 35.6}{6.3 + 35.6} = 5.3 \text{ Ом} \quad (4.10)$$

Як видно, опір заземлювача перевищує нормативний (4 Ом), тому збільшимо кількість заземлювачів:

$$n = 10$$

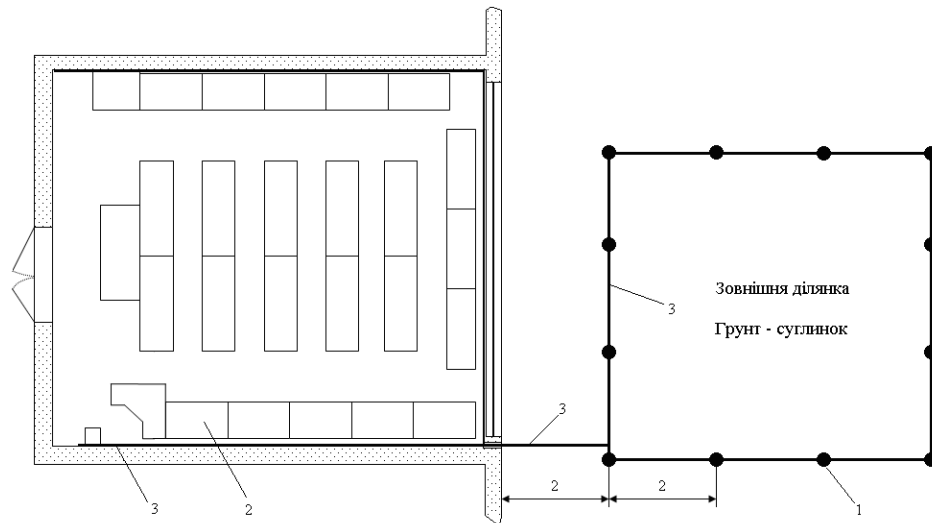
тоді опір заземлювача в цілому складе  $R_3 = 4.6$  Ом, що теж більше  $R_n$ .

Якщо  $n = 11$ , то  $R_3 = 4.2 > R_n$ .



Якщо  $n = 12$ , то  $R_3 = 3.99 < R_H$ .

Число заземлювачів дорівнює 12, які розміщені по контуру зовнішньої ділянки, як показано на рисунку 4.5.



1 – заземлювачі

2 – електроустаткування що заземлюється

3 – сполучна смуга

Рисунок 4.5 – Розміщення заземлюючих електродів на зовнішній ділянці та сполучної смуги лабораторії проведення експерименту

Таким чином, для виконання захисного заземлення використовується 12 вертикальних стержнів діаметром 0.04 м, завдовжки 2.5 м, кожен з яких має опір 31.5 Ом. Опір сполучної смуги 13.2 Ом. Опір заземлювачів в цілому складе 3.99 Ом, що забезпечує безпечну роботу на установках лабораторії.

### Висновки та рекомендації

Отже, за результатами роботи можна зробити наступні висновки:

- 1) в роботі пропонується розвести оптичні канали реєстрації оптичних сигналів для УФ та ІЧ випромінювання кожен окремо із пристроями реєстрації та обробки сигналів;
- 2) в систему обробки сигналів пропонується об'єднати лічильник світлових імпульсів, АЦП та інтерфейс з'єднання із ПК;
- 3) із аналізу кривих пропускання напівпровідників ZnO, легованих Ga в залежності від концентрації домішок, видно, що найбільш вигідним для використання у якості реєструючого елемента для ІЧ випромінювання пропонується використати напівпровідники ZnO, леговані Ga з вмістом 2,5 ат.%;

4) для каналу реєстрації ІЧ випромінювання в роботі рекомендовано ФЕП Н10720-20. Для ФЕП Н10720-20 розроблено нове високовольтне імпульсне джерело живлення;

5) для оцінки енергії фотонів, які пройшли каналом реєстрації у роботі пропонується використати лічильник на мікросхемі CD4026, яка дає можливість звести до мінімуму супутні елементи навантаження і те, що вона не потребує додаткового налаштування;

6) у якості інтерфейсу з'єднання каналу реєстрації слабких оптичних сигналів із персональним комп'ютером (ПК) пропонується використати мікросхему MAX232 фірми Texas Instruments, яка перетворює сигнали послідовного порту RS-232 у сигнали придатні для використання в цифрових схемах на базі ТТЛ або КМОП технологій;

7) аналіз шумових процесів показав, що використання лавинних фотодіодів у якості реєструючих приладів є більш привабливим. У подальших розробках пропонується замінити ФЕП на лавинні фотодіоди.

8) у результаті моделювання роботи функціональних блоків в редакторі Proteus було показано, що параметри пристрою для реєстрації слабких оптичних сигналів задовольняють вимогам, поставленим у завданні до роботи;

9) розрахунки за техніко-економічними показниками визначили можливість макетної реалізації пристрою реєстрації слабких оптичних сигналів з меншими витратами, порівняно із зарубіжними аналогами;

10) розроблено заходи за умовами дотримання техніки безпеки та охорони праці робіт, що планується здійснити.

У якості рекомендацій можна зазначити наступне:

1) пристрій може бути використаним для оптичних систем передачі інформації у УФ, ІЧ та видимому діапазонах світлового випромінювання;

2) розробка може бути використана у лабораторному практикумі кафедри МЕІС з цифрової та аналогової схемотехніки.

## Перелік посилань

1. Чео П.К. Волоконная оптика: Приборы и системы / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Гауэр Дж. Оптические системы связи / Пер. с англ. М. : Радио и связь, 1989. 504с.
3. Шевцов Э.О., Белкин М.Е. / Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передачи. М. : Радио и связь, 1992. 224 с.
4. Бычков С.И., Румянцев К.Е. Поиск и обнаружение оптических сигналов. Монография. / Под. ред. К.Е. Румянцева. М.: Радио и связь. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 282 с.
5. Higgins, N. V. Thermal detectors feel the heat of light / N. V. Higgins // Laser Focus World. – 1994. - № 11. - P. 65 - 70.
6. Martin, J. E. Design considerations for the construction of an absolute radiation detector at the NPL / J. E. Martin, P. R. Haycocks // Metrologia. - 1998. - V. 35. - № 4. - P. 229 – 233.

7. Купко, А. Д. Эталон силы света в Украине / А. Д. Купко, Л. А. Назаренко // Світлотехніка та електроенергетика. - 2001. - № 1. - С. 15 - 26.
8. Справочник по приемникам оптического излучения. / В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гассанов и др. ; под ред. Л. З. Криксунова Л. С. Кременчугского. - К. : Техніка, 1985. - 216 с.
9. Gardner, J. L. A four-element transmission trap detector / J. L. Gardner // Metrologia. - 1995. - V. 32. - № 6. - P. 469 - 472.
10. Fox, N. P. Improved Near-Infrared Detectors / N. P. Fox // Metrologia. - 1993. - V. 30. - № 4. - P. 321 - 325.
11. Добровольский, Ю. Г. Прилади НВФ „Тензор” для метрологічних досліджень параметрів світлового середовища / Ю. Добровольский Ю. Г., Шабашкевич Б. Г. // Світлотехніка та електроенергетика. - 2009. - № 3. - С. 25 - 29.
12. Шабашкевич, Б. Г. Особливості розробки ультрафіолетового радіометра / Б. Г. Шабашкевич // Український метрологічний журнал. - 2005. - № 3. - С. 34 - 38.
13. A new high ultraviolet sensitivity FTO-GaP Schottky photodiode fabricated by spray pyrolysis / A. Malik, A. Seco, E. Fortunator et al // Semicond. Sci. and Technol. - 1998. - V. 13. - P. 102 - 107.
14. Патент 71544 України, МПК Н 01 L 31/00. Фотодіод для ультрафіолетової області спектра / Малік А. І., Шабашкевич Б. Г., Пироженко С. І., заявка на патентовласника ТОВ „Тензор” №2000010281; заявка 18.01.2000, опубл. 15.12.2004, Бюл. № 2.
15. Биксей М. П. Фотоприемник ультрафиолетового излучения на основе фосфида галлия / М. П. Биксей, Ю. Г. Добровольский, Б. Г. Шабашкевич // Прикладная физика. - 2005. - № 4. - С. 97 - 100.
16. Радиометр ультрафиолетового излучения «Тензор-31» / В. К. Бутенко, Ю. Г. Добровольский, Б. Г. Шабашкевич, В. Г. Юрьев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2006. - № 5. - С. 43 - 45.

17. Спектрофотометр СФ-46. Техническое описание и руководство по эксплуатации Ю 34.11.629 ТО
18. Narukawa Y., Kawakami Y., Funato M., Shizuo Fujita, Shigeo Fujita, Nakamura S. Appl. Phys. Lett.- 70.- 981.-1997.
19. Mukai T., Morita D., Nakamura S. J. Cryst. Growth.- 189.- 778.- 1998.
20. Tampo H., Yamada A., Fons P., Shibata H., Matsubara K., Iwata et al. Appl. Phys. Lett. - 84.- 22.- 4412.-2004.
21. Chen Y., Yao T. \Mater.Sci.Eng.- B.-75.- 190.- 2000.
22. Look D.C. Mater.Sci.Eng.B - 80.- 383.- 2001.
23. Look D.C., Reynolds D.C., Litton C.W., Jones R.L., Eason D.B., Cantwell G. Appl. Phys. Lett. - 81.- 10.- 1830.- 2002.
24. Heo Y.W., Kwon Y.W., Li Y., Pearton S.J., Norton D.P.. Appl. Phys. Lett. -84.- 3474. -2004.
25. Yoshino K., Oyama S., Kato M., Oshima M., Yoneta M., Ikari T. Annealing effect of In-doped ZnO films grown by spray pyrolysis method // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – V.100. – P.1-4.
26. Shwets E. Ja., Svitanko N. V., Hripko S. L., Verevkin L. L., Kiselev E. N., Posunko A. P., Zholudev G. K. Optical and physical properties of ZnO films // Materials of the Second International Conference “Physical and chemical principles of formation and modification of micro- and nanostructures” FMMN’2008. - October 8-10, 2008, Kharkiv, Ukraine.
27. Модулі ФЕП Hamamatsu [Електронний ресурс] – Режим доступа:[hamamatsu-su/products/moduli-feu/](http://hamamatsu-su/products/moduli-feu/)(дата звернення: 07.10.2019).
28. К176ИЕ4 (аналог cd4026) счетчик по модулю 10 с выводом на 7-сегментный индикатор DIP14[Електронний ресурс] – Режим доступа: [prom.ua/p352280485-k176ie4-analog-cd4026.html/](http://prom.ua/p352280485-k176ie4-analog-cd4026.html/)(дата звернення: 07.10.2019).
29. Switchmode power supply handbook [Текст]:справочник/Keith Billings и др. - New York: McGrawHill. – 2011. - 850 с.
30. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. 7-е изд. М.: Мир, 2009. 704 с.

31. Calcutt D., Cowan F., Parchizadeh H. 8051 Microcontrollers: An Applications Based Introduction. Oxford: Newnes, 2004.
32. Measures R.M. Laser remote sensing. Fundamentals and applications. Krieger Publishing Company. -Malabar. Florida. - 1992. - 510 p.
33. Photosensor modules H10720/H10721 series. Hamamatsu: веб-сайт. Режим доступа:<http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/alpha/C/3044/H10721-210/index.html> (дата звернення: 20.10.2018).
34. Si APD S8664 series. Hamamatsu: веб-сайт. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/category/3100/4003/4110/S866402K/index.html> (дата звернення 20.10.2019).
35. Nir-photomultiplier tubes and their applications. Hamamatsu: веб-сайт. Режим доступа: [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/NIR-PMT\\_APPLI\\_TPMO1040E.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/NIR-PMT_APPLI_TPMO1040E.pdf) (дата звернення 20.10.2018).
36. InGaAs APD G8931-20. Hamamatsu: веб-сайт. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4003/4111/G8931-20/index.html> (дата звернення 20.10.2019).
37. Чухов В. В., Антоненко О. О. // ВИСОКОШВИДКІСНИЙ ОДНОФОТОННИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ СИСТЕМ КВАНТОВОЇ КРИПТОГРАФІЇ Режим доступа: [http:// http://eztuir.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/841/1/206.pdf](http://eztuir.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/841/1/206.pdf) (дата звернення 20.10.2019).
38. Белуха М.Т. Основи наукових досліджень. К.: Вища шк., 1997. 271с.
39. Кожемякін Г.Б. Рижков В.Г., Белоконь К.В. Охорона праці та техногенна безпека: методичні вказівки до виконання розділу магістерських робіт для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 48 с.
40. Ткачук К.Н. Охрана труда и окружающей среды в радиоэлектронной промышленности. К. : Вища шк., 1988. 240 с.
41. Горобец А.И., Степаненко А.И. Охрана труда в радиоэлектронной промышленности. К. : Техника, 1987. 345 с.

Додаток А



ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Науково-дослідна частина ЗНУ  
Наукове товариство студентів, аспірантів,  
докторантів і молодих вчених ЗНУ

**15-17 квітня 2019 року**

*XII університетська науково-практична конференція  
студентів, аспірантів і молодих вчених*

**«МОЛОДА НАУКА-2019»**



Запоріжжя, 2019

**Кузнєцов Олександр**  
студент освітнього рівня магістр 1 курсу ФФЕІТ  
Наук. кер.: доцент, кандидат фізико математичних наук Світанько М.В.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ СЛАБКИХ ІНФРАЧЕРВОНИХ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ

У роботі представлено розробку пристрою для реєстрації слабких інфрачервоних оптичних сигналів.

Інфрачервоне випромінювання - електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між червоним кінцем видимого світла і мікрохвильовим радіовипромінюванням[2]. Довжина хвилі інфрачервоного випромінювання складає 700 нм[3].

Інфрачервоне дистанційне керування застосовується останні 30 років практично у всій побутовій електронній апаратурі[2]. У інфрачервоного світла досить невелика потужність і він невидимий людському оку діапазоні. Як і всяке світло, в земних умовах воно поширюється по прямій, тобто не огинає предмети, не проходить через непрозорі об'єкти, але в тій чи іншій мірі від них відбивається[3].

Для випромінювання використовуються ІЧ-світлодіоди, що працюють в імпульсному режимі, а для реєстрації – ІЧ-фотодіод або ІЧ-фототранзистор. Останні як правило, в апаратурі закриваються ІЧ-фільтрами для зниження чутливості.

Для досягнення високої перешкодозахищеності і збільшення кількості доступних переданих команд використовуються модульовані ІЧ-сигнали.

Модуляція сигналу-процес зміни несучого сигналу відповідно до форми вихідного сигналу .

Модуляція необхідна для того, щоб наш сигнал виділявся на фоні шуму. З модуляцією ІЧ сигнал блимає з певною частотою. ІЧ-приймач налаштований на цю частоту, тому він може ігнорувати все інше. Сигнал реєструючого фотоелемента необхідно посилити і демодулювати.

Демодуляція сигналу - процес виділення вихідного сигналу на фоні несучого.

Процес реєстрації даних відбувається за допомогою платформи апаратно-програмних засобів для побудови простих систем автоматичної і робототехніки Arduino до якої підключений ІЧ-приймач. Arduino працює за заздалегідь записаною в неї програмою[1].

### Література

1. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства: Пер. с англ. – СПб./ Блум Джереми // БХВ-Петербург, 2015. — 336 с.
2. Оптика. — Л / Романюк М. О., Крочук А. С., Пашук І. П. // ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. — 564 с.
3. Электромагнитные волны и оптика: Учеб. Пособие. / Литвинов О.С., Горелик В.С. // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 448 с.

**МАТЕРІАЛИ**  
**XXIV НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ**  
**КОНФЕРЕНЦІЇ**  
**СТУДЕНТІВ, МАГІСТРАНТІВ,**  
**АСПІРАНТІВ І ВИКЛАДАЧІВ**  
**ІНЖЕНЕРНОГО ІНСТИТУТУ**  
**ЗНУ**

**Секція мікроелектронних  
інформаційних систем**

**29 листопада 2019 р.**

УДК 662.99

Кузнецов Олександр ст.гр. МН-18-1мд ФЕЕІТ

Левінзон Д.І., професор, доктор технічних наук – науковий керівник

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ СЛАБКИХ ІНФРАЧЕРВОНИХ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Інженерний інститут Запорізького національного університету, кафедра МЕІС

У роботі представлено розробку пристрою для реєстрації слабких інфрачервоних оптичних сигналів.

Інфрачервоне випромінювання - електромагнітне випромінювання, що займає спектральну область між червоним кінцем видимого світла і мікрохвильовим радіовипромінюванням[1].

У інфрачервоного світла досить невелика потужність і він невидимий людському оку діапазоні. Як і всяке світло, в земних умовах воно поширюється по прямій, тобто не огинає предмети, не проходить через непрозорі об'єкти, але в тій чи іншій мірі від них відбивається[2].

Для випромінювання використовуються ІЧ-світлодіоди з довжиною хвилі 700нм, що працюють в імпульсному режимі, а для реєстрації – ІЧ-фотодіод або ІЧ-фототранзистор. Останні як правило, в апаратурі закриваються ІЧ-фільтрами для зниження чутливості.

Для досягнення високої перешкодозахищеності і збільшення кількості доступних переданих команд використовуються модульовані ІЧ-сигнали.

Модуляція сигналу-процес зміни несучого сигналу відповідно до форми вихідного сигналу .

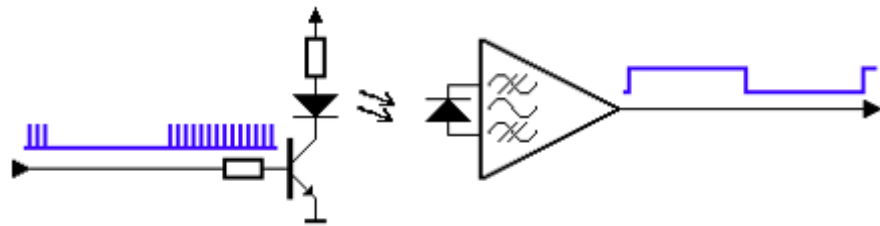


Рисунок 1 – Схема перетворення сигналу

Модуляція необхідна для того, щоб наш сигнал виділявся з фону шуму. З модуляцією ІЧ сигнал блимає з частотою 38 кГц. ІЧ-приймач налаштований на цю частоту, тому він може ігнорувати все інше. Сигнал реєструючого фотоелемента необхідно посилити і де модулювати – виділити вихідний сигнал на фоні несучого. перетворення сигналу на рис.1.

Розроблено пристрій для реєстрації слабких інфрачервоних сигналів. Досліджено метод реєстрації слабких інфрачервоних сигналів за допомогою широтно-імпульсної модуляції.

### Література

1. Оптика. — Л / Романюк М. О., Крочук А. С., Пашук І. П. // ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. — 564 с.
2. Электромагнитные волны и оптика: Учеб. Пособие. / Литвинов О.С., Горелик В.С. // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 448 с.