

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»  
Завідувачка кафедри

\_\_\_\_\_ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ  
\_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня магістр**

зі спеціальності 171 Електроніка освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»  
на тему: Фотоприймальні оптичні системи: розрахунок та схеми підключення

Здобувача групи ЕП.м-22 Козміна Іллі Юрійовича

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

\_\_\_\_\_ Ілля КОЗМІН

Керівник доцент кафедри ЕЗПФ,  
канд. фіз.-мат. наук, доцент

\_\_\_\_\_ Ірина ПАЗУХА

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики  
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма  
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

«06» листопада 2023 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**  
**Козміна Іллі Юрійовича**

1. Тема роботи: Фотоприймальні оптичні системи: розрахунок та схеми підключення  
затверджена наказом по університету від «15» листопада 2023 р., № 1260-VI
2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 12 грудня 2023 року
3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)  
Фотоприймачі, що перетворюють оптичний сигнал в електричний, знаходять широке практичне застосування в сенсорній електроніці, при детектуванні лазерного випромінювання, спектрофотометрії, медико-біологічних дослідженнях тощо. Правильно вибраний фотоприймач не лише допомагає вирішити проблеми, пов'язані із прийманням оптичних сигналів, але й спрощує електронні схеми та зменшує ймовірність виникнення помилок.  
Мета даної роботи полягає у проведенні аналізу типових схем включення приймачів випромінювання та узгоджувальними каскадами фотоприймальних пристроїв та розрахунку основних параметрів фотоприймальних пристроїв в залежності від обраної схем включення.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)
  1. Фізичні основи роботи та основні параметри фотоприймальних пристроїв.
  2. Вимоги до підбору приймача випромінювання.
  3. Типові схеми підключення фотоприймальних пристроїв.
  4. Розрахунок фотоприймальних оптичних систем.
  5. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Слайди № 1-2 – Загальна інформація  
Слайди № 3-6 – Фізичні основи роботи за основні параметри фотоприймальних

пристроїв

Слайди № 7-9 – Підбір приймача випромінювання

Слайди № 10 – Вибір схем підключення фотоприймальних пристроїв

Слайди № 11-13 – Результати розрахунків

Слайд № 14 – Висновки

6. Дата видачі завдання 06.11.2023 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 13.11.2023 р.	
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 27.11.2023 р.	
3.	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 12.12.2023 р.	
4.	Попередній захист роботи	13.12.2023 р., 13 <sup>00</sup> (онлайн)	
5.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	19.12.2023 р. – 20.12.2023 р., 11 <sup>30</sup>	

Здобувач вищої освіти

І.Ю. Козмін

Керівник роботи

І.М. Пазуха

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 31 сторінці, зокрема, містить 14 рисунків, список використаних джерел із 12 найменувань.

Фотоприймачі, що перетворюють оптичний сигнал в електричний, знаходять широке практичне застосування в сенсорній електроніці, при детектуванні лазерного випромінювання, спектрофотометрії, медико-біологічних дослідженнях тощо. Правильно вибраний фотоприймач не лише допомагає вирішити проблеми, пов'язані із прийманням оптичних сигналів, але й спрощує електронні схеми та зменшує ймовірність виникнення помилок.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає в проведенні аналізу типових схем включення приймачів випромінювання та узгоджувальними каскадами фотоприймальних пристроїв та розрахунку основних параметрів фотоприймальних пристроїв в залежності від обраної схем включення.

Під час виконання роботи використовувались для розрахунків основних параметрів використовувався електронний ресурс WolframAlpha, а для практичної реалізації схем – електронний ресурс Autodesk Tinkercad.

Розрахунки первинного фотоструму провідності для елемента ФСК-2 показали, що величина  $I_{\phi} = 1,899 \cdot 10^{-5}$  А є достатньою малою, тому для даної схеми і обраного фотоприймача є фактично безінерційним та буде змінюватися прямо пропорційно до величини світлового потоку, що потрапляє на нього. При розрахунках опору навантаження необхідно враховувати, що опір  $p-n$  переходу залежить від величини фотоструму. За умов сильної зміни величини ІФ оптимальне значення опору навантаження підібрати досить складноіти.

**Ключові слова:** фотоефект, фотоприймач, схема підключення, первинний фотострум, опір навантаження.

## ЗМІСТ

	с.
<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1 ФОТОПРИЙМАЛЬНІ ОПТИЧНІ СИСТЕМИ</b> .....	7
1.1 Фізичні основи роботи фотоприймальних пристроїв .....	7
1.2. Основні параметри фотоприймальних пристроїв .....	9
1.3. Приклади конструкцій фотоприймальних пристроїв.....	13
<b>РОЗДІЛ 2 ТИПОВІ СХЕМИ ВКЛЮЧЕННЯ ПРИЙМАЧІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА УЗГОДЖУВАЛЬНИМИ КАСКАДАМИ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ</b> .....	17
2.1 Підбір приймача випромінювання .....	17
2.2 Типові схеми включення приймача випромінювання.....	18
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ</b> .....	22
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	29
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	30

## ВСТУП

Фотоприймачі - це важливий елемент в сучасних технологіях, які використовуються для перетворення світлового сигналу в електричний. Вони використовуються в різних галузях, включаючи медицину, наукові дослідження, телекомунікації та багато інших.

Фотоприймачі можуть бути різних типів, залежно від їх застосування. Наприклад, фотодіоди використовуються для виявлення світла в оптоволоконних системах передачі даних, тоді як фотомультіплікатори використовуються в наукових дослідженнях для виявлення надслабких світлових сигналів. Напівпровідникові фотоприймачі з малою шириною забороненої зони характеризуються високою чутливістю до випромінювання інфрачервоною діапазону ( $\lambda = 3-50$  мкм), що зумовлює їх практичне використання в таких галузях як: екологічний моніторинг, лазерний зв'язок, спектроскопія, медична діагностика, астрономія.

Правильний підбір відповідного фотоприймача не лише допомагає вирішити проблеми, пов'язані з прийманням оптичних сигналів, але й спрощує електронні схеми та зменшує ймовірність виникнення помилок. Як правило, вибір фотоприймача здійснюють виходячи з даних про параметри оптичного випромінювання: довжини хвилі, що відповідає максимальній спектральній потужності випромінювання, часових параметрів випромінювання (тривалість імпульсів або частота модуляції), потужності випромінювання, що потрапляє на фотоприймач.

Мета даної роботи полягає у проведенні аналізу типових схем включення приймачів випромінювання та узгоджувальними каскадами фотоприймальних пристроїв та розрахунку основних параметрів фотоприймальних пристроїв в залежності від обраної схем включення.

## РОЗДІЛ 1

### ФОТОПРИЙМАЛЬНІ ОПТИЧНІ СИСТЕМИ

#### 1.1 Фізичні основи роботи фотоприймальних пристроїв

Фотоприймач - це пристрій, який перетворює світлові промені в електричні сигнали. Фізичні принципи роботи фотоприймача ґрунтуються на явищах фотоефекту - це явище, при якому світлова енергія перетворюється в електричну. Це відбувається внаслідок того, що світлова хвиля може збуджувати електрони в атомах речовини, надаючи їм достатньої енергії для того, щоб вони покинули атом.

Явище фотоефекту можна виразити як:

$$E_{k(max)} = E_{\text{світло}} - \Phi$$

де  $E_{k(max)}$  – це максимальна кінетична енергія викинутих електронів;

$E_{\text{світло}}$  – енергія електромагнітного випромінювання, що падає на поверхню металу;

$\Phi$  – робоча функція металу.

Основна експериментальна установка [1], яка пояснює фотоефект (рис. 1.1). Типова установка складається з металеві пластини, на яку світиться світло. Ця пластинка називається емітером (натрій на малюнку). Навпроти емітера знаходиться пластинка, яка називається колектором. Емітер підключається до негативної клеми джерела змінної постійної напруги, а колектор підключається до позитивної клеми. Світло потрапляє на випромінювач, що викликає випромінювання фотоелектричних електронів. Електрони притягуються до позитивно зарядженого колектора і встановлюється фотострум. Як правило, випромінювання, що надходить на емітер, походить від ртутної газорозрядної трубки, яка виробляє світло на характерних частотах спектру ртуті. Окремі лінії ртуті можна виділити відповідними оптичними фільтрами.

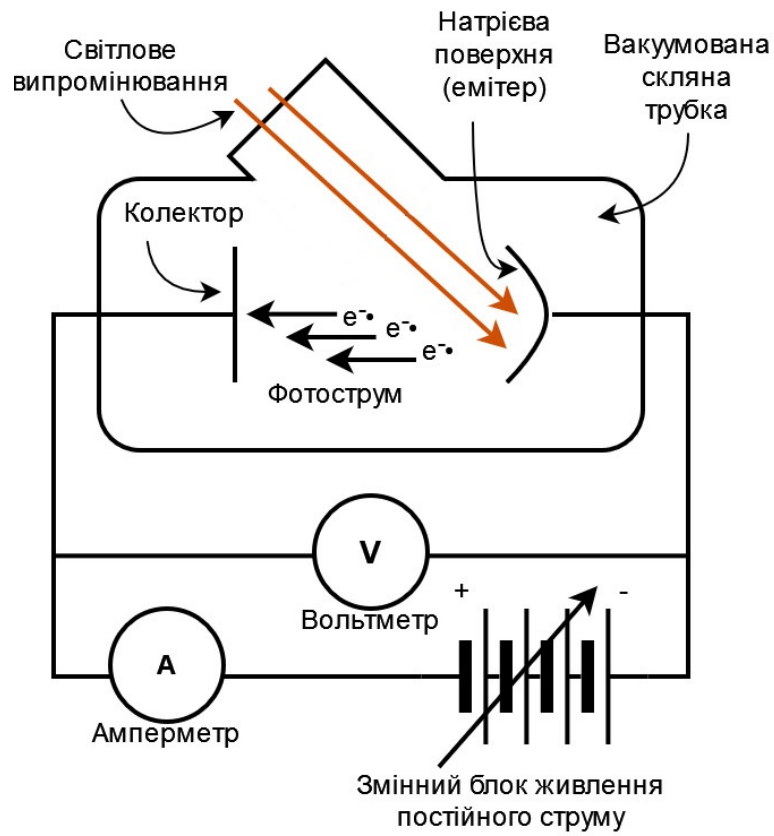


Рисунок 1.1 – Фотоелектричний випробувальний пристрій [1]

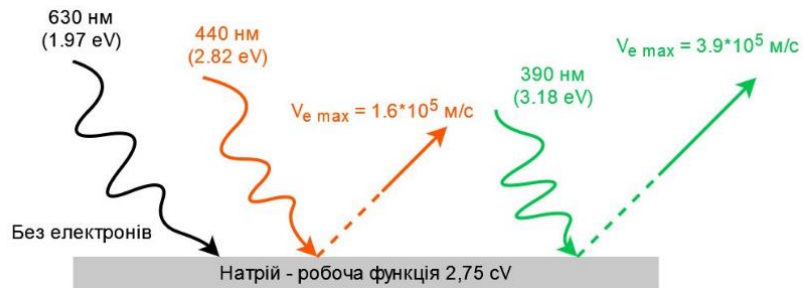


Рисунок 1.2 – Зображення принципу роботи фотоелекту [1]



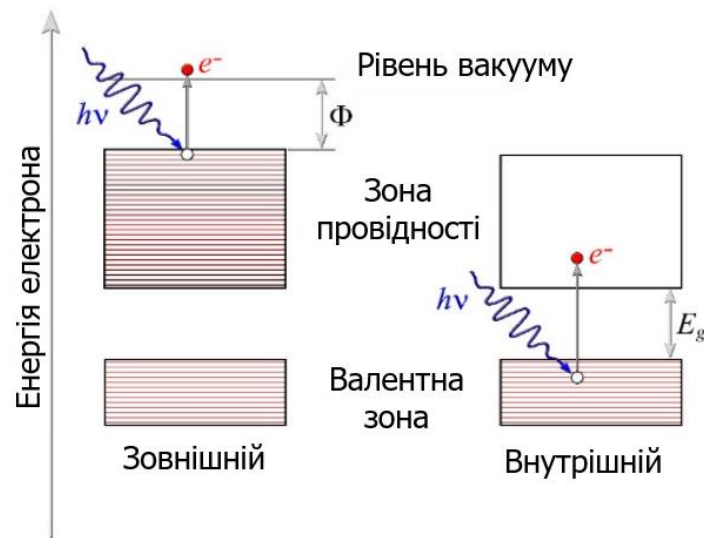


Рисунок 1.3 – Різниця між зовнішнім і внутрішнім фотоелементом [1]

Існує два основних типи фотоелемента: зовнішній і внутрішній.

Зовнішній фотоелемент - це вивільнення електронів з речовини під дією світла. Електрони, які вивільняються внаслідок фотоелемента, називаються фотоелектронами. Фотоелектрони можуть генерувати електричний струм, якщо вони зібрані на електроді. Фотоелемент використовується в фотоелементах, які є основою для таких пристроїв, як фотоапарати, сонячні батареї та фотокопіювальні машини.

Внутрішній фотоелемент - це збільшення електропровідності речовини під дією світла. При внутрішньому фотоелементі світлова енергія збуджує електрони в атомах речовини, але вони не вивільняються з атомів. Замість цього вони переходять на вільні енергетичні рівні, що призводить до збільшення кількості вільних електронів у речовині. Внутрішній фотоелемент використовується в таких пристроях, як фоторезистори та фотодіоди.

## 1.2. Основні параметри фотоприймальних пристроїв

**Чутливість**, і вона може задаватись певними параметрами [2]. Перший це *чутливість за струмом*, що являє собою відношення приросту струму самого приймача до приросту потоку випромінювання і виражений у наступному рівнянні:

$$S_J = \frac{\Delta J}{\Delta \Phi} [\text{A/Vт}].$$

Струм буде зростати відповідно до освітленості у пару десятків мкА, після чого перестане зростати потрапивши до зони насичення.

Другим параметром є *чутливість за напругою*. Параметр являє собою відношення приросту напруги на опорі навантаження приймача до приросту потоку випромінювання. Виражається наступною формулою:

$$S_U = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi} [\text{B/Vт}].$$

За загальним правилом узгодження опорів джерела та приймача сигналів, для отримання максимальної вольтової чутливості, значення опору навантаження та внутрішнього фотоприймача мають бути близькими один до одного. Слід додати, що спектральне випромінювання буде впливати на названі чутливості, тож сонячне і лазерне випромінювання, якщо їх потужність буде однаковою, будуть викликати різну реакцію у фотоприймача.

Також є *чутливість спектральна* - це відношення приросту струму через фотоприймач  $\Delta J$  чи напруги на фотоприймачі  $\Delta U$  до

приросту квазімонохроматичного потоку випромінювання  $\Delta \Phi_\lambda$  за середньою довжиною хвилі  $\lambda$ .

$$S_\lambda = \frac{\Delta J}{\Delta \Phi_\lambda} [\text{A/Vт}].$$

Ця чутливість виражена як через фотометричні, так і енергетичні параметри у паспортних даних.

$$S_\lambda = 683k_\lambda S'_\lambda.$$

$S_\lambda$  і  $S'_\lambda$  позначають спектральну чутливість в А/Вт та А/лм.

638 лм/Вт - спектральна світлова ефективність випромінювання за хвилею у довжину в 555 нм

$k_\lambda$  – відносна видимість випромінювання

Ця характеристика дає змогу визначити чутливість приймача до випромінювання за хвилею з довжиною  $\lambda_0$ .

*Інтегральна* являє собою чутливість приймача до оптовипромінювання у стандартному спектрі. У видимому спектрі чутливість визначається за допомогою лампи розжарювання на 100Вт зі спіраллю із вольфраму. Така конфігурація забезпечує колірну температуру у 2856К. В ІЧ діапазоні використовується модель АЧТ, колірна температура якого становить 1273К.

Також слід зазначити *пороговий потік випромінювання*, що в англомовній літературі позначають як NEP (Noise Equivalent Power), він визначається як потужність випромінювання, яка надходить на вхід фотоприймача, при якій в смузі частот 1 Гц на виході приймача потужність сигналу  $P_s$  стає рівною потужності шуму  $P_n$ , простіше кажучи відношення сигналу до шуму і записується як:

$$\Phi_{th} = \frac{\sqrt{U_n^2}}{S_U \sqrt{\Delta f}} [\text{Вт} * \text{Гц}^{-1/2}].$$

$\Delta f$  – це смуга частот фотоелектричного сигналу, та дорівнює одиниці.

У чисельнику зазначено середнє квадратичне значення шуму.

**Квантова ефективність.** Вона визначається як відсоток потоку фотонів, який фотоприймач здатний перехопити, що призводить до генерації вільних носіїв заряду в самому фотоприймачі.

$$\eta = (hc/e)S_\lambda/\lambda \approx 1240 S_\lambda/\lambda.$$

$S_\lambda$  виражається у А/Вт, а  $\lambda$  у нм.

Цей параметр, в основному, відноситься до зовнішньої квантової ефективності, відрізняючись від менш поширеної внутрішньої квантової ефективності (відсоток потоку фотонів, поглинутих фотоприймачем, який викликає генерацію вільних носіїв заряду). При рентгенівському випромінюванні квантова ефективність може бути більше одиниці.

**Темновий струм.** Фотоприймач, як елемент електричного ланцюга, характеризується його темновим опором  $R_d$ , який є внутрішнім опором неосвітленого фотоприймача ( $\Phi = 0$ ). Якщо до неосвітленого фотоприймача прикладена робоча напруга  $U$ , то через нього протікає темновий струм  $J_d$ . Струм фотоприймача:

$$J = J_n + J_\Phi,$$

де  $J_n$  – це шумовий струм, а  $J_\Phi$  – це фотострум

Темновий струм є важливою характеристикою та входить до паспортних даних фотоприймача.

**Коефіцієнт шуму** – це величина, яка вказує на те, наскільки відношення сигналу до шуму зменшується після того, як сигнал проходить через фотоприймач. Відношення записується як:

$$F = (P_s/P_n)_{in}/(P_s/P_n)_{out},$$

де  $P_s$  – потужність сигналу.

$P_n$  – потужність шуму.

**Ват-амперна характеристика** показує, як струм фотоприймача  $J$  змінюється в залежності від потоку випромінювання  $\Phi$ , що може бути інтегральним або монохроматичним. Ця характеристика, в основному, є лінійною. Її фотометричний відповідник - це люкс-амперна (або світлова) характеристика.

**Частотну характеристику** зазвичай представляють як залежність відносного значення фотоструму від частоти. Стала часу  $\tau$  є параметром, який

використовується для оцінки швидкодії фотоприймача. Цей параметр відображає інерційність фотоелектричного ефекту, на основі якого працює фотоприймач, а також залежить від конструкції фотоприймача, матеріалу, з якого він зроблений, та режиму його роботи. Сталу часу визначають за зменшенням фотоструму або фотонапруги в  $e = 2,72$  рази після припинення освітлення фотоприймача.

**Робоча напруга.** Її підвищення може збільшити чутливість та швидкодію фотоприймача, але водночас це може збільшити ймовірність пробою. Робоча напруга, яка вказана у паспорті фотоприймача, гарантує надійну та довготривалу роботу приладу, забезпечуючи високі показники якості.

**Добротність фотоприймача** є його загальною характеристикою, та позначається як:

$$Q = G\Delta f,$$

де  $G$  – позначає коефіцієнт його підсилення.

Якщо можливо збільшити коефіцієнт підсилення фотоприймача, це відбувається за рахунок зменшення смуги пропускання. Можна незначно збільшити добротність фотоприймача, вдосконалюючи його технологію та використовуючи нові матеріали.

### 1.3. Приклади конструкцій фотоприймальних пристроїв

Фотоприймачі бувають різних типів, але всі вони використовують внутрішній фотоелектричний ефект. Найпоширеніші типи фотоприймачів: фотодіоди, фоторезистори, фототранзистори, фотогальванічні елементи. Розглядаючи оптичні системи зв'язку можна виділити ряд певних фізичних особливостей у порівнянні з іншими.

Першою особливістю можна назвати велику пропускну здатність оптичних сигналів через високу частоту несучої, що складає  $10^{14}$  Гц [3]. Швидкість передачі даних по лініям оптичного зв'язку може сягати ТБіт/с, що дорівнює 125

Гбайт/с. Враховуючи, що на сьогоднішній день найпопулярніший пакет від провайдерів домашнього інтернету містить швидкість з'єднання до 100 Мбіт/с, що 12.5 Мбайт/с, швидкість оптичного з'єднання у 10000 разів швидша. Також можна згадати носії інформації. Найпоширеніші жорсткі диски, а їх середня швидкість читання та запису складає 200 Мбайт/с, що повільніше у 625 разів. Більш сучасні SSD накопичувачі, середня швидкість яких близьк 550 айт/с, а це е 227 разів повільніше. Але це використовуючи тип з'єднання SATA. Якщо використовувати найсучасніший для домашнього використання тип M.2, швидкість яких у середньому становить 2500 Мбайт/с, це все одно аж у 50 разів повільніше за швидкість оптичного з'єднання. А через те, що світлові хвилі мають можливість поширюватись у тому ж волокні незалежно, швидкість обміну даними може бути збільшена за рахунок їх передачі в дві сторони, вже не кажучи про те, що швидкість може бути подвоєна за рахунок поширення сигналів різних поляризацій.

Другою є особливості поширення сигналу у його середовищі, де його послаблення з відстанню дуже низьке у порівнянні з іншими. Послаблення сигналу в розмірі 0.22 дБ/км при довжині хвилі 1.55 мкм є одними з найкращих наших показників. Такі досягнення дають змогу протягувати лінії зв'язку до 100 км без необхідності у підсиленні чи відновленні сигналу. такі результати можна порівняти з досягненнями інших країн світу, де волокно Sumitomo має послаблення у 0.154 дБ/км при тій самій довжині хвилі, а оптичні лабораторії США повідомляють про розробку прозорих фторцирконатних волокнах, що в теорії можуть мати послаблення у 0.02 дБ/км при довжині хвилі у 2.5 мкм. На основі таких показників можна зробити висновок, що теоретично можна було б будувати лінії зв'язку з відстанню між вузлами підсилення у 4.6 тис. км при цьому все ще мати швидкість зв'язку до гігабіта за секунду.

Оптоелектричні транспортні властивості in-situ легованих азотом SiCNWPTs при УФ-освітленні (254 нм, 302 нм і 365 нм) [4]. SiCNWs погано реагували на освітлення вище довжини хвилі 254 нм, демонструючи селективну чутливість до глибокого УФ-світла. Крім того, прилади демонстрували амбіполярну транзисторну поведінку в темряві, тоді як прилади

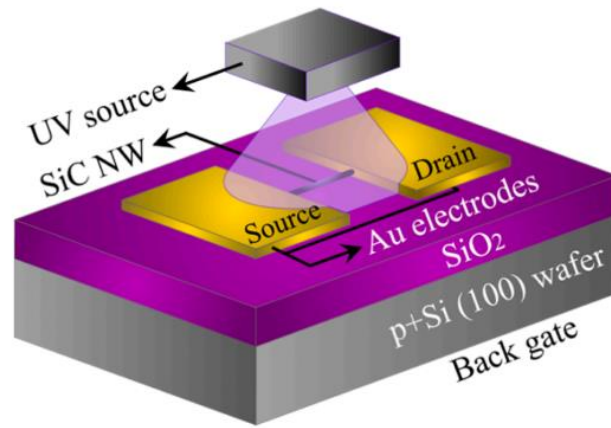


Рисунок 1.4 - Установка для вимірювання робочих характеристик фототранзистора [4]

перетворювалися на р-домінантні фототранзистори при УФ-освітленні з довжиною хвилі 254 нм, демонструючи дуже сильний ефект затвора з максимальним і мінімальним відношенням струму ( $I_{max}/I_{min}$ ) 4783,8. Більше того, прилади показали зміщення мінімальної точки провідності в бік нижчих напруг затвора під впливом УФ-освітлення. Важливо зазначити, що для повного розуміння механізму фотоіндукованої зміни полярності для легованих SiCNW-RTs необхідні подальші дослідження. Таким чином, економічно ефективний підхід до виготовлення, а також грані характеристики фототранзисторів SiCNW є перспективними для майбутніх нанорозмірних пристроїв УФ-сенсорики та зв'язку для широкого спектру оптоелектронних застосувань.

Надмасштабована архітектура фототранзистора  $MoS_2$  з високою світлочутливістю та швидким часом відгуку [5]. Використання високоякісного  $Al_2O_3$  як діелектрика затвора дозволило істотно захопити фотогенеровані дірки під час роботи пристрою в режимі виснаження, що призвело до сильного ефекту фотостробірування. Досягнуто високої чутливості  $8,84 \cdot 10^8$  А/Вт і питомої чутливості  $1,65 \cdot 10^{13}$  Джонса, а тритермінальна природа пристрою була використана для досягнення спектральної однорідності з невеликими або повними витратами на площу/енергію/матеріал. Довгий час релаксації фотоструму було обійдено за допомогою електростатично індукованого вилучення дірок шляхом застосування коротких імпульсів стирання до

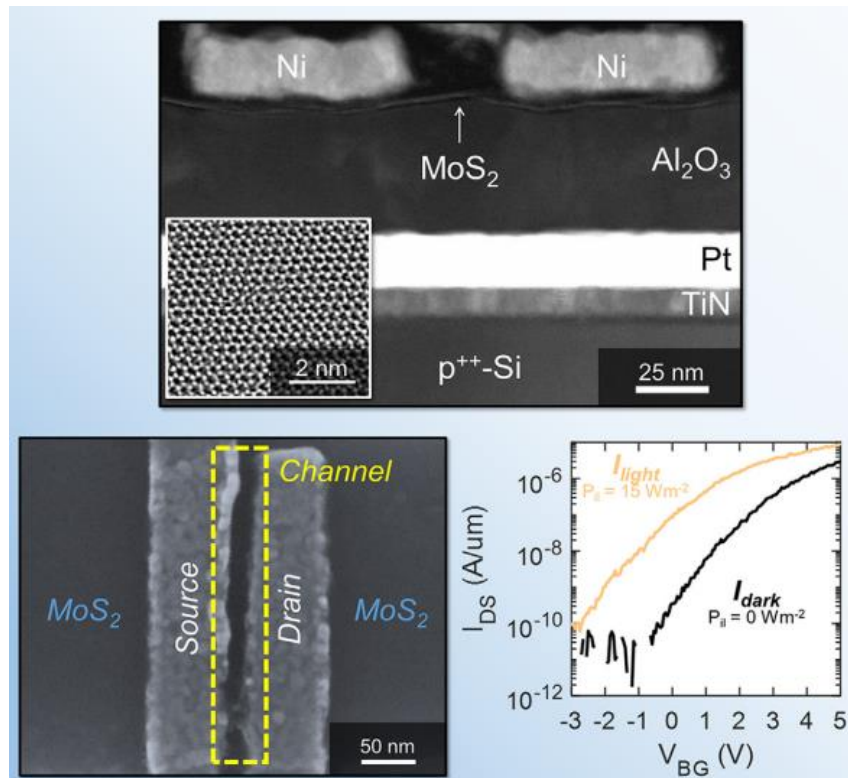


Рисунок 1.5 – Мікроснімок структури та робоча характеристика нанорозмірного фототранзистора [5]

терміналу затвора, дозволяючи загальний час відгуку  $< 2$  мс. Примітно, що витрати енергії на кожну операцію виявлення/стирання коливаються від 0,5 до 2 фДж для широкого спектрального та динамічного діапазону, що вказує на високу енергоефективність для повсякденних застосувань. Загальний активний об'єм пристрою становив  $44,23 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}^3$  (активна площа  $< 0,007 \mu\text{m}^2$ ), що, наскільки відомо, є найменшим об'ємом пристрою, зареєстрованим на сьогодні для фотодетектора на основі 2D-матеріалу. Крім того, використання нанорозмірних контактів ( $L_c = 80$  нм) дозволило зробити загальну площу пристрою  $< 0,06 \mu\text{m}^2$ . Це демонструє потенціал нових двовимірних матеріалів і пристроїв для подальшого масштабування в галузі оптоелектроніки. Крім того наведені показники лише покращаться, оскільки методи фокусування світла в нанорозмірних областях продовжують вивчатися і покращуватися. Таким чином, подальше поглиблене вивчення плазмонних ефектів у ультрамасштабованих фототранзисторах представляло б величезний інтерес для спільнот 2D та оптоелектроніки.



## РОЗДІЛ 2

# ТИПОВІ СХЕМИ ВКЛЮЧЕННЯ ПРИЙМАЧІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА УЗГОДЖУВАЛЬНИМИ КАСКАДАМИ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

### 2.1 Підбір приймача випромінювання

Енергетичний розрахунок оптичного електронного перетворювача (ОЕП) є ключовим для визначення параметрів, характеристик і типу приймача. Цей розрахунок включає аналіз основного енергетичного рівняння, яке описує алгоритм роботи приладу і виглядає як функція параметрів джерела випромінювання, передавальна оптична система, середовище розповсюдження потоку та приймальна оптико-електронної системи. Можна визначити спектральний діапазон роботи приймача, виявлену здатність, чутливість, площу чутливого шару та вимоги до постійної часу [6].

Пеленгатори, локатори та зіркові датчики потребують приймачі з найвищою виявленою здатністю, задовольняючою швидкодією, невеликого розміру та вагою, а також гарною стійкістю до динамічних зовнішніх умов. Високоточні лабораторні ОЕП вимагають високостабільних приймачів з високою чутливістю, а переносні ОЕП - малогабаритних приймачів з низькою напругою живлення.

Вибір приймача також залежить від специфіки ОЕП та особливостей окремих класів і типів приймачів. Наприклад, для роботи в видимій області спектру можна використовувати фотоелементи, ФЕУ, фоторезистори на основі CdS, CdSe. У малогабаритній швидкодіючій апаратурі можна використовувати високочастотні фотодіоди, зокрема p-i-n фотодіоди і лавинні фотодіоди. Також використовуються багатоелементні фотодіоди, фоторезисторні лінійки і матриці. Для аналізу зображення використовуються передавальні телевізійні трубки та їх твердотільні аналоги - ПЗЗ та ПЗІ.

Гібридні мозаїчні приймачі створені для інфрачервоного спектру, бо їх

чутливий шар зроблений з окремих фоторезисторів чи фотодіодів, під'єднаних до ПЗЗ комірок.

Багатоелементний приймач випромінювання обирається за розміром чутливого шару одного елемента, загальною кількістю елементів, чутливістю, однорідністю параметрів елементів та рівнем шумів.

Узгоджуючи параметри та характеристики приймача та оптичної системи необхідно обрати робочий спектральний діапазон, спектр випромінювання джерела і пропускання сигналу у середовищі, а також оцінити розміри оптичної системи та приймача.

Також слід враховувати певні вимоги під час розробки електричної схеми попереднього підсилювача, наприклад схема підсилювачів не повинна бути складною, температурні умови для попереднього підсилювача, рівень шумів та опір, а також для імпульсних сигналів динамічний діапазон ФПП за напругою, не враховуючи автоматичний регулюючий пристрій, має бути не менше 60 дБ. Для гармонійних сигналів цей діапазон має становити не менше 40 дБ.

## **2.2 Типові схеми включення приймача випромінювання**

У ланцюгу утворюється електричний сигнал, що позначений на схемі як  $U_c$  (рис. 2.1). Цей сигнал зазвичай невеликий та у виконавчих пристроях чи блоках індикації та реєстрації він не використовується як  $\epsilon$ . Для його коректного використання треба зробити з наступним електронним трактом підсилення та узгодження. Саме ланцюг підсилювача та зв'язку і займається виконанням цієї задачі. Додатково слід зазначити, що пунктирною лінією позначені ті конденсатори, що являють собою особисту ємність приймача випромінювання, а також ємність монтажу ланцюга включення.

Так як особиста ємність приймачів може змінюватись з одиниць пФ аж до сотень, а це у свою чергу створює проблеми під час вибору параметрів узгодження ланцюгів, а внутрішній опір більшої частини приймачів випромінювання буває як малим, а це до десятків Ом, так і великим, що може

доходити до сотень МОм, якщо порівнювати з вхідним опором підсилювачів,

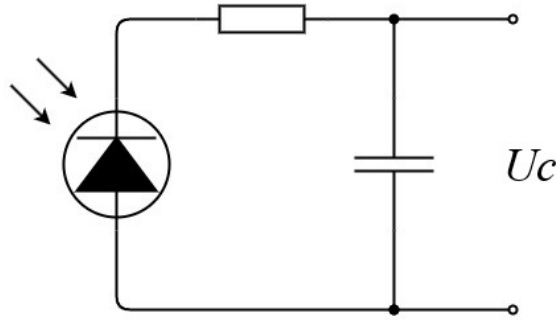


Рисунок 2.1 – Приймач-генератор ЕРС (термоелемент, фотодіод в фотогальванічному режимі роботи)

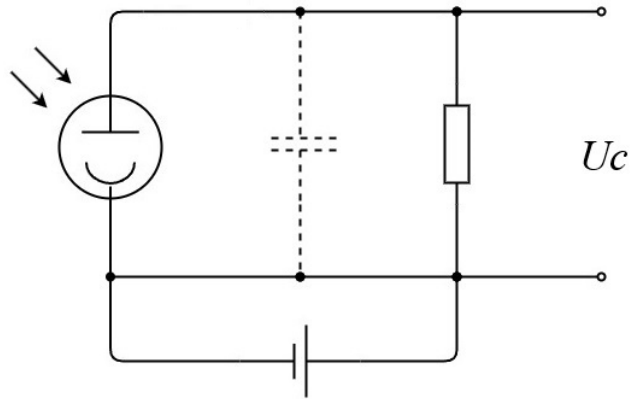


Рисунок 2.2 – Приймач-генератор струму (ФЕУ, фотоелементів)

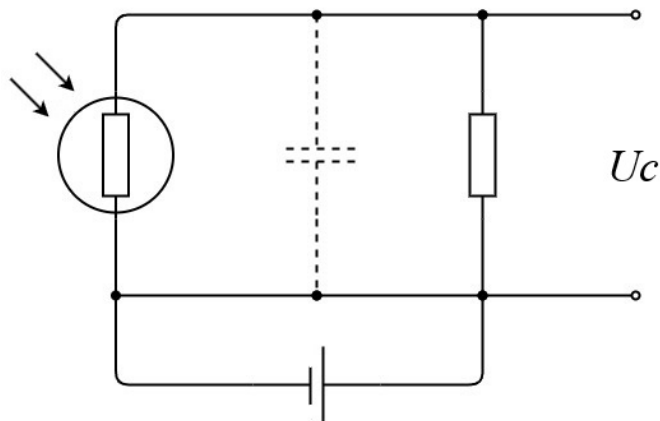


Рисунок 2.3 – Приймач-генератор зміни опором (фоторезистор, болометр)

виникає необхідність в узгодженні. Також середнє квадратичне значення напруги шумів електронного тракту, що приведено до входу  $\tilde{y}_{ш.е.вх}$ , має бути набагато меншим за середнє квадратичне значення напруги шумів приймача за для попередження втрат корисної інформації від випромінювача.

В ОЕП у якості ланцюгів зв'язку використовуються емітерний, істоковий чи катодний повторювачі для приймачів випромінення великого опору (рис. 2.4). Трансформаторний ланцюг для приймачів низького опору, а якщо вхідний опір минулого підсилювача  $R_{вх}$  та особистий опір приймача в цілому однакові - RC-ланцюг (рис. 2.5).

Фотоприймальний пристрій (ФПП) - це пристрій, який перетворює потік випромінювання в електричний сигнал. Він складається з: власне приймача випромінювання, ланцюга включення і узгоджувального каскада.

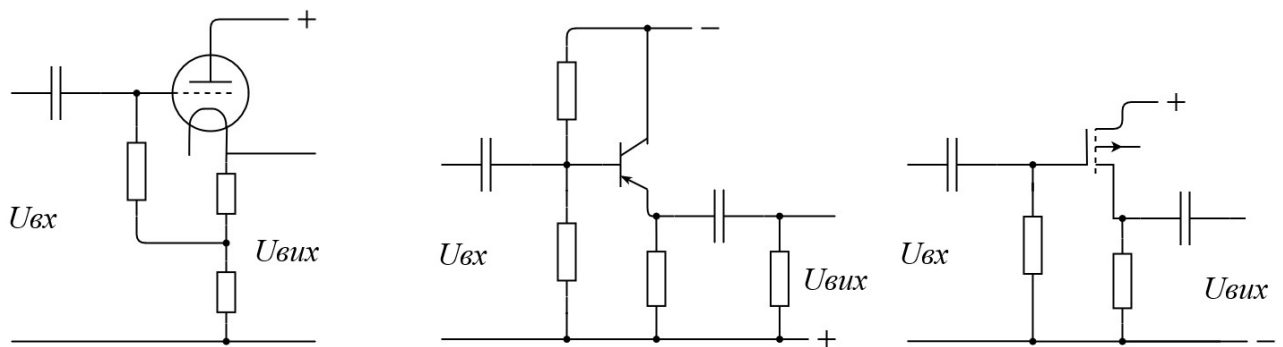


Рисунок 2.4 – Катодний, емітерний та істоковий повторювачі

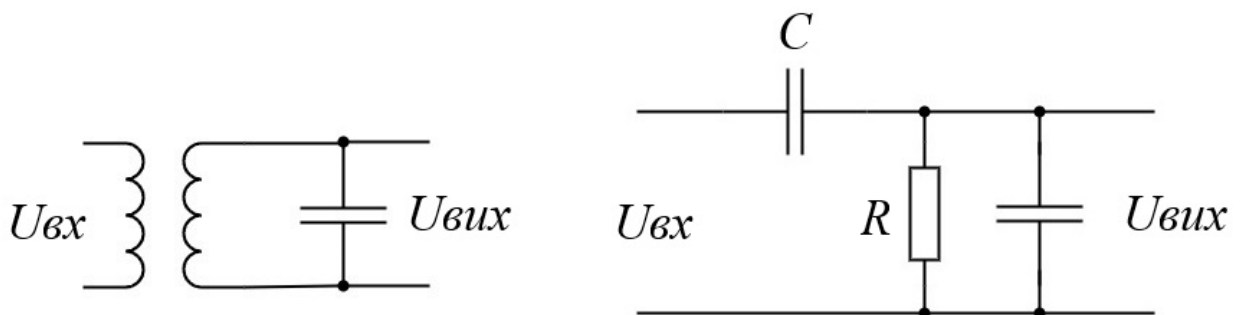


Рисунок 2.5 – Трансформаторний та RC ланцюги

У традиційних ФПП приймач випромінювання є одноелементним. Він перетворює весь отриманий потік випромінювання в один електричний сигнал. У цьому випадку ланцюг включення ФПП виконує лише функцію узгодження приймача випромінювання з входом електронного тракту.

У сучасних ФПП все частіше застосовують багатоелементні приймачі випромінювання. Вони одночасно виконують функції перетворення потоку випромінювання в електричний сигнал і аналізу зображення. У цьому випадку ланцюг включення ФПП може виконувати додаткові функції, такі як: селекція оптичного сигналу за допомогою багатокольорових фільтрів, попереднє підсилення електричного сигналу, електричне узгодження приймача випромінювання із входом електронного тракту, Найпростіша попередня обробка сигналу, наприклад, фільтрація, запам'ятовування тощо.

Крім того, до ФПП можуть бути також включені вузли, що виконують охолодження або термостабілізацію приймача випромінювання, стабілізацію його робочої точки по напрузі живлення, автоматичне регулювання живлення та внутрішню комутацію електричного сигналу.

За вимогами до потужності розсіювання і граничної температури визначаються енергетичні показники роботи ФПП. При підвищенні температури зменшується допустима напруга та потужність, а також погіршуються електричні характеристики. Крім того, можлива поява механічних дефектів, таких як тріщини в кристалах, обрив з'єднувальних провідників та металізації, а також порушення герметичності.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИБОРІВ

#### 3.1 Розрахунок схеми підключення фоторезистора

Для визначення первинного фотоструму фоторезистора була використана схема, зображена на рисунку 3.1. Для розрахунку даного параметру [6] вихідними даними були вибрані наступні параметри:

- величина електричного опору фоторезистора в темному середовищі  $R_T = 3,5 \text{ МОм}$ , що називається темновим струмом  $I_T = 40 \text{ мкА}$ ;
- опір навантаження  $R_H$ , що визначається схемою підключення та параметрами фоторезистора;
- відношення електричного опору фоторезистора в темновому середовищі до світлового електричного опору  $R_T/R_c = 10$ .

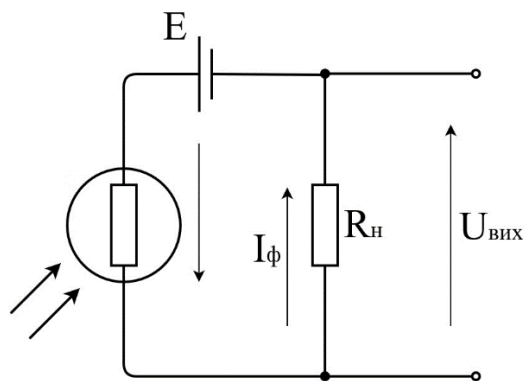


Рисунок 3.1 – Схема включення фоторезистора

Опір навантаження можна визначити із формули темного струму, на випадок якщо на фоторезистор не падає світло. Формула темного струму записується наступним чином:

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_H}$$

де  $E$  - електрорушійну силу живлення,

$R_T$  - опір фоторезистора у темноті,

$R_H$  – опір навантаження.

Звідси можна отримати опір навантаження, що необхідний у подальших розрахунках і записується це наступним чином:

$$R_H = \frac{I_T * R_T - E}{I_T} = \frac{40 * 10^{-6} * 3.5 * 10^6 - 130}{40 * 10^{-6}} = 2.5 * 10^5 \text{ Ом.}$$

У випадку, коли світло потрапляє на фоторезистор, ситуація дещо змінюється. Перехід електронів у зону провідності починає споживати енергію фотонів, що у свою чергу збільшує кількість вільних пар електрон-дірка, зменшує опір фоторезистора і дозволяє світловому струму протікати через нього.

Повернувшись до вхідних даних розрахунків, із співвідношення  $\frac{R_T}{R_C}$  можна визначити  $R_C$  і отримаємо:

$$R_C = \frac{3.5 * 10^6}{10} = 3.5 * 10^5.$$

У свою чергу формула для розрахунку світлового струму фоторезистора виглядає наступним чином:

$$I_C = \frac{E}{R_C + R_H} = \frac{130}{3.5 * 10^5 + 2.5 * 10^5} = 2.16 * 10^{-4} \text{ А.}$$

Первинний фотострум провідності  $I_\Phi$  можна отримати із дельти темного та світлового струмів. Цей фотострум записується наступним чином:

$$I_\Phi = I_C - I_T = 2.16 * 10^{-4} - 40 * 10^{-6} = 1.76 * 10^{-4} \text{ А.}$$

В ситуації, коли променевий потік є невеликим, первинний фотострум провідності практично не має інерції і змінюється прямо пропорційно величині променевого потоку, який падає на фоторезистор. Зі збільшенням променевого потоку зростає кількість електронів провідності. Пересуваючись всередині речовини, електрони взаємодіють з атомами, іонізують їх, створюючи додатковий потік електричних зарядів, він називається вторинним фотострумом провідності. Рух електронів провідності сповільнюється через збільшення кількості іонізованих атомів призводить до того, що зміна фотоструму в часі стає меншою в порівнянні із зміною світлового потоку, а це визначає певну інерційність фоторезистора.

## 3.2 Розрахунок схеми підключення фотодіоду

### 3.2.1 Визначення максимального опору навантаження та вольтової чутливості

Для визначення максимальний опір навантаження та вольтову чутливість для приймача (у даному випадку фотодіоду ФД-1) була використана схема, зображена на рисунку 3.2. Для розрахунку даних параметрів вихідними даними були вибрані наступні параметри:

- величина темнового струму фотодіоду  $I_T = 30$  мкА;
- величина струмової інтегральної чутливості  $S_I = 6$  мА/лм;
- величина максимального потоку випромінювання, що може зареєструвати діод  $\Phi_{max} = 20$  мВт.

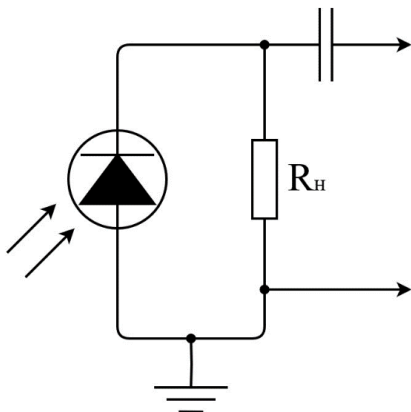


Рисунок 3.2 – Схема включення фотодіоду ФД-1



Максимальний опір навантаження за постійним струмом, у разі фотогальванічного режиму роботи, визначають як:

$$R_{n \max} = \frac{0.2 * k * T}{e * I_{F \max}}$$

де  $k = 1.38 * 10^{-23} \text{ Дж} * \text{К}^{-1}$  – постійна Больцмана;

$T$  – це абсолютна температура фотодіода, що вимірюється у К;

$e$  – заряд електрона.

Для розрахунків треба отримати значення максимального фотоструму. Через струмову інтегральну чутливість, потік випромінювання необхідно також представляти у світлових величинах за допомогою коефіцієнта відносності видності. Записується це наступним чином:

$$V_{\lambda} = \frac{F}{\Phi_e} \rightarrow F = V_{\lambda} * \Phi_e = 13.6 \text{ лм},$$

$$\text{де } V_{\max} = 680 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}.$$

Повертаючись до максимального опору навантаження за постійним струмом отримуємо:  $R_{n \max} = 0.062 \text{ Ом}$ .

Опір навантаження визначається як:

$$R_n = \frac{0.88 * A * k * T}{e * I_0} * \frac{\ln\left(\frac{I_F}{I_0}\right)}{\frac{I_F}{I_0}} = 2.153 \text{ Ом}.$$

Максимальна вольтова чутливість:

$$S_{U \max} = \frac{\frac{S_I * k * T}{e * I_0}}{\frac{1 + k * T}{e * I_0 * Z_n}} = 0.013 \frac{\text{В}}{\text{лм}},$$

де  $Z_n$  – повний опір навантаження.

Але важливо враховувати, що оскільки опір р-п переходу залежить від інтенсивності світла, оптимальний опір навантаження в умовах значної зміни фотоструму вибрати стає неможливим.

### 3.2.2 Визначення відношення сигнал/шум на виході підсилювача

Для розрахунку відношення сигнал/шум при підключенні фотодіоду у схему з підсилювачем (рис. 3.3) (у даному випадку використали фотодіод ФД-8к) вихідними даними були вибрані наступні параметри:

- величина темнового струму фотодіоду  $I_T = 0,005$  мкА;
- величина струмової інтегральної чутливості  $S_I = 8$  мА/лм;
- величина максимального потоку випромінювання, що може зареєструвати діод,  $\Phi_{max} = 37$  мВт;
- смуга пропускання  $\Delta f = 100$  МГц.

У схему був підключений підсилювач К140УД1А, що характеризується наступними параметрами: коефіцієнтом підсилення при розімкненому зворотному зв'язку  $K = 0,5 \cdot 10^3$ , входним опором при наявності зворотного зв'язку:  $R_{вх} = 37$  кОм.

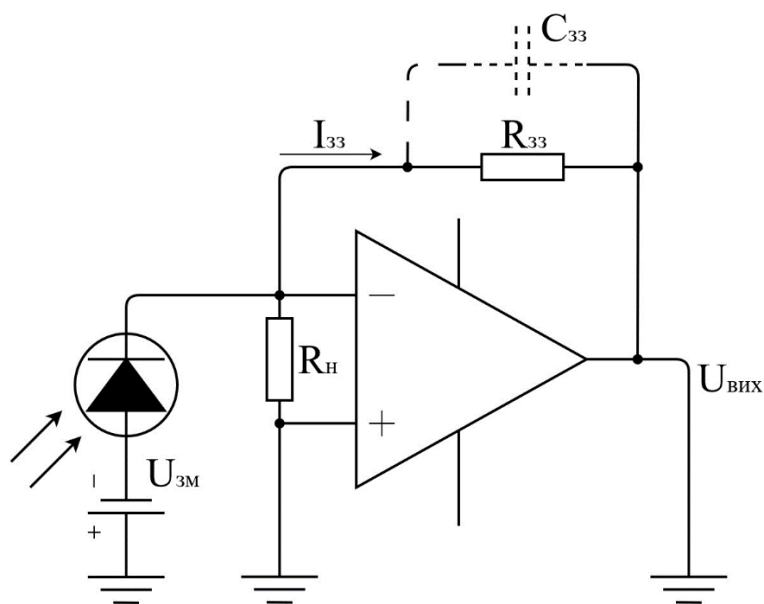


Рисунок 3.3 – Схема включення фотодіоду ФД-8к

Шуми резистора зворотного зв'язку та фотодіода домінують у ситуації з малошумними операційними підсилювачами, а відношення сигналу до шуму має такий вигляд:

$$\left(\frac{U_c}{U_{ш}}\right) = \frac{S_I * \Phi}{\sqrt{(i_{ш.ФД}^2 + \bar{i}_{ш.з.з}^2)}}.$$

Для рішення цього рівняння необхідно отримати невідомі значення. За формулою можна отримати значення середнього квадратичного шумового струму опору у ланцюгу зворотного зв'язку, що має вигляд:

$$\bar{i}_{ш.з.з} = \sqrt{\frac{4 * k * T * \Delta f}{R_{з.з}}} = 8.99 * 10^{-10} \text{ A}.$$

Але для розрахунків не вистачає опору зворотного зв'язку. Цей опір можна знайти завдяки формулі вхідного опору ФПП з операційним підсилювачем за наявністю зворотного зв'язку:

$$R_{вх} = \frac{R_{з.з}}{K_0} \rightarrow R_{з.з} = R_{вх} * K_0 = 2.10^6 \text{ Ом},$$

де  $R_{з.з}$  позначає опір у ланцюгу зворотного зв'язку (з.з.);

$K_0$  – це коефіцієнт підсилення у розімкненому з.з. операційного підсилювача.

Останнім залишилось отримати значення середнього квадратичного шумового струму фотодіода, а формула має вигляд:

$$\bar{i}_{ш.ФД} = \sqrt{2 * e * I_T * \Delta f} = 4.002 * 10^{-10} \text{ A},$$

де  $I_T$  - темновий струм,

$\Delta f$  - ефективна смуга пропускання.

Маючи усі необхідні дані, можна повернутись на початок до формули відношення сигналу до шуму і підставити значення та отримати відповідь 204.4

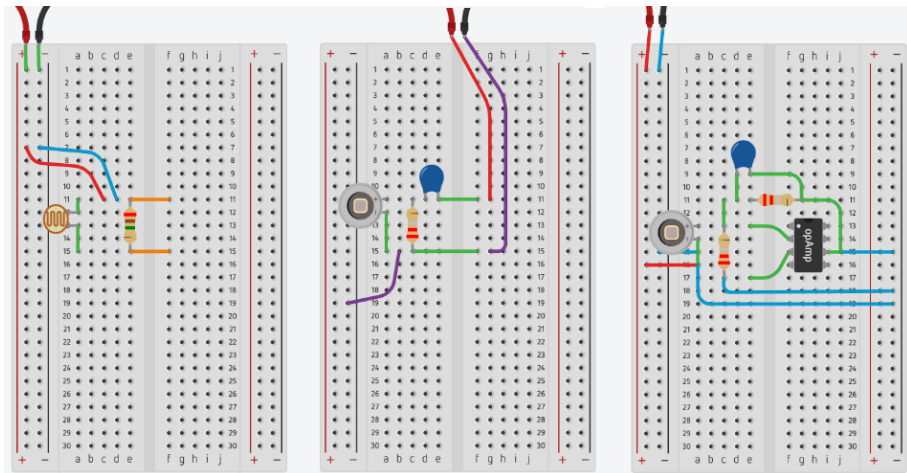


Рисунок 3.4 – Реалізація схем включення фотоелементів у Tinkercad

Онлайн-ресурс Tinkercad від компанії Autodesk [7] - це безкоштовне браузерне програмне забезпечення, яке дозволяє працювати у сфері 3D-модельовання, будувати програмовані блоки коду та робити симуляції простих електричних схем. За його допомогою усі три попередні схеми були побудовані у віртуальному середовищі Tinkercad.

## ВИСНОВКИ

1. Фотоприймачі - це важливий елемент в сучасних технологіях, які використовуються для перетворення світлового сигналу в електричний, знаходять широке практичне застосування в сенсорній електроніці, при детектуванні лазерного випромінювання, спектрофотометрії, медико-біологічних дослідженнях тощо.

2. Здійснення енергетичного розрахунку оптоелектронних пристроїв є важливим етапом при їх проектуванні і дозволяє вибрати оптимальні параметри для досягнення бажаних характеристик та функціональності пристрою в конкретних умовах використання.

3. В основі побудови схем підключення фотоприймальних оптичних систем знаходяться наступні принципи: простота, стабільність роботи в широкому діапазоні температур (від  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ ), низький рівень власних шумів попереднього підсилювача (на рівні від 3 до 10 разів нижчому від рівня шумів приймача).

4. Розрахунки первинного фотоструму провідності для елемента ФСК-2 показали, що величина  $I_{\phi} = 1,899 \cdot 10^{-5}$  А є достатньою малою, тому для даної схеми і обраного фотоприймача є фактично безінерційним та буде змінюватися прямо пропорційно до величини світлового потоку, що потрапляє на нього.

5. При розрахунках опору навантаження необхідно враховувати, що опір  $p-n$  переходу залежить від величини фотоструму. За умов сильної зміни величини ІФ оптимальне значення опору навантаження підібрати досить складно.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. LED as Transmitter and Receiver of Light: A Simple Tool to Demonstration Photoelectric Effect / Giuseppe Schirripa Spagnolo, Fabio Leccese, Mariagrazia Leccisi – Crystals 2019, 9, 531.
2. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. / В. О. Чадюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – Кн. 1. – 376 с.
3. Осадчук В.С. Волоконно-оптичні системи передачі. Навчальний посібник / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук – Вінниця: ВНТУ, 2005. — 225 с.
4. Photoinduced polarity shift of in-situ nitrogen-doped silicon carbide nanowire phototransistors / Kasif Teker, Ilayda M. Tamay – Optics and Laser Technology 170 (2024) 110236.
5. Ultra-scaled phototransistors based on monolayer MoS<sub>2</sub> / Thomas F. Schranghamer, Sergei P. Stepanoff, Nicholas Trainor, Joan M. Redwing, Douglas E. Wolfe, Saptarshi Das – Device 1, 100102, October 20, 2023.
6. Проектування та метрологічне забезпечення оптичних та оптикоелектронних приладів: Практикум для здобувачів освітньо-наукового ступеня «доктор філософії» зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка усіх форм навчання [Електронний ресурс] / [Упоряд. : Трембовецька Р.В., Гальченко В.Я., Тичков В.В., Бондаренко М.О.] ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2020. – 235 с.
7. Tinkercad [Електронний ресурс] // tinkercad.com – URL : <https://www.tinkercad.com>
8. Improving phototransistor performance with polymer-quantum dot hybrid technology / Saman Shirmohammadi, Davoud Raeyani, Asghar Asgari – Infrared Physics and Technology 134 (2023) 104880.
9. Nanoscale patterning on layered MoS<sub>2</sub> with stacking-dependent morphologies and optical tuning for phototransistor applications / H. Park, M.M.

Rahman, A. Bala, Y.-H. Kim, A. Sen, Y.-M. Kim, J. Lee, S. Kim – *Materials Today Nano* 23 (2023) 100367.

10. Однодворець Л. В. Матеріали і компоненти функціональної електроніки : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 196 с.

11. Light triggering performance of the van der Waals heterojunction of 2D/0D graphdiyne/graphdiyne quantum dot as a novel phototransistor / Zhaleh Ghafary, Abdollah Salimi, Rahman Hallaj, Keivan Akhtari, Foad Ghasemi – *Carbon* 215 (2023) 118475.

12. WolframAlpha [Електронний ресурс] // wolframalpha.com – URL : <https://www.wolframalpha.com>