

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

проф. Валерій Антонович Скришевський

Протокол №____ засідання кафедри

від “____” _____ 2023 р.

**ПОРТАТИВНА СИСТЕМА ПІДСВІЧУВАННЯ СЕНСОРА З
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИНЦИПОМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ РІДКИХ АНАЛІТІВ ІЗ ПОЛЯРНОЮ ХІМІЧНОЮ
СТРУКТУРОЮ**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра
студента спеціальності

105 Прикладна фізика та наноматеріали

ОП «Нанофізика та комп’ютерні технології»

Кузнєцова Віктора Вікторовича

Наукові керівники

асистент кафедри нанофізики

конденсованих середовищ

к.ф.-м.н. **Сусь Богдан Богданович**

кандидат фізико-математичних наук

асистент кафедри нанофізики конденсованих середовищ

к.ф.-м.н. **Козинець Олексій Володимирович**

Оцінка захисту роботи _____

Київ – 2023 р.

АНОТАЦІЯ

Кузнєцов В. В. Портативна система підсвічування сенсора з фотоелектричним принципом перетворення для дослідження рідких аналітів із полярною хімічною структурою. – Випускна кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали ОП «Нанofізика та комп'ютерні технології».

У роботі проведено дослідження природи роботи фотоелектричних сенсорів та кремнієвих сенсорних структур. Проведено порівняння варіантів рішень реалізації схеми портативного фотоелектричного сенсора для дослідження полярних рідких аналітів для визначення оптимального методу реалізації пристрою. Зібрано установку-прототип на базі мікроконтролера ESP32, створено програмну прошивку. Проведено тестові виміри для оцінки якості отриманого сигналу та визначено майбутні кроки для покращення пристрою.

Ключові слова: сенсорні структури, фотоелектричні перетворення, сенсор, рекомбінація, підсвічування, сканування, детектор, полярна хімічна будова, кремнієві структури з фотоелектричним принципом перетворення, модуляція за амплітудою, світлова матриця, алгоритми.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНИЙ ПРИНЦИП РОБОТИ СЕНСОРНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ P-N-ПЕРЕХОДУ	7
1.1 Фотоелектричний принцип перетворення та елементи на його основі	7
1.2 Сенсорні структури з фотоелектричним принципом перетворення ...	11
1.3 Рекомбінаційний фотоелектричний сенсор	18
1.4 Шуми при фотодетектуванні	22
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПУ СЕНСОРУ НА ОСНОВІ LED-МАТРИЦІ.....	23
2.1 Постановка задачі	23
2.2 Структура вимірювальної системи	25
2.3 Способи реалізації схеми керування матрицею	27
2.3.1 Порівняння ШІМ і аналогового керування інтенсивністю світлодіодів.....	27
2.3.2 Керування секвенцією матриці.....	29
2.4 Моделювання і 3D-друк компонентів для установки	29
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМИ.....	32
3.1 Технічний огляд і вибір компонентів	32
3.1.1 Світлодіодна матриця	32
3.1.2 Модулятор	33
3.1.3 Цифро-аналоговий перетворювач і керування інтенсивністю	33
3.1.4 Мікроконтролер.....	33
3.1.5 Опис схеми приймальної частини	35

3.1.6 Додаткова підсвітка.....	36
3.2 Проектування схеми у Fritzing.....	37
3.3 Програмний код мікроконтролера і алгоритм роботи	39
3.4 Збирання схеми	40
3.5 Підготовка кремнієвого зразка	42
РОЗДІЛ 4. ВИМІРЮВАННЯ І ОБРОБКА СИГНАЛІВ	43
4.1 Вимірювання.....	43
4.2 Обробка результату.....	44
ВИСНОВКИ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48
ДОДАТОК 1	52
ДОДАТОК 2	54

ВСТУП

Актуальність роботи. Дослідження у галузях аналітичної хімії та біохімії є надзвичайно важливими на шляху вирішення проблем в екології, медицині, фармацевтиці, матеріалознавстві та промисловості. Існує потреба дослідження рідких аналітів з полярною хімічною структурою, зокрема різноманітних органічних сполук, білків, амінокислот, нуклеїнових кислот, а також розчинів полярних речовин [1]. Виявлення і дослідження цих речовин часто ускладнюються їхньою низькою концентрацією в зразку та чутливістю до зовнішніх впливів.

Портативна система для аналізу таких сполук дозволить ефективно виявляти і досліджувати їх, та робити це швидко у різних умовах. Вона може знайти застосування у екологічних дослідженнях (аналіз водних зразків, пошук хімічних забруднень, моніторинг стану навколишнього середовища), контролі якості продуктів харчування і виробничих процесів, медичній діагностиці (швидший аналіз крові, сечі, слини, оцінка ефективності лікування), навчанні (вивчення фотоелектричного принципу перетворення, дистанційні лабораторні роботи), експериментальних дослідженнях та багатьох інших галузях.

Метою роботи є розробка та створення портативної системи підсвітки сенсора з фотоелектричним принципом перетворення для детекції рідинних аналітів з полярною хімічною будовою, для подальшого покращення алгоритмів роботи та підвищення точності роботи системи. Головною метою є забезпечити пристрою портативність, масштабованість і точність роботи, аби він знаходив практичні застосування там, де це необхідно.

Досягнення мети потребуватиме вирішення таких **завдань**:

- Дослідити принцип роботи сенсорних структур на основі р-п-переходу, особливості фотоелектричного типу перетворення
- Окреслити завдання по створенню портативного сенсору, ключові вимоги до його характеристик та можливостей

- Проаналізувати можливі варіанти реалізації схеми для досягнення поставлених завдань та обрати оптимальне схемотехнічне рішення
- Зібрати розроблений пристрій в експериментальну установку
- Протестувати отриману систему та визначити подальші кроки для покращення пристрою

Об'єктом дослідження цієї роботи є сенсор з фотоелектричним принципом перетворення та система його підсвітки

Предмет дослідження – створення портативної системи для дослідження рідинних аналітів із полярною хімічною будовою

Методи дослідження включають вивчення фізичних ефектів, що лежать в основі роботи, порівняння різних можливих підходів до реалізації схеми, моделювання, оптимізацію, створення програмного коду, виготовлення пристрою

Практичне значення полягає у можливості досліджувати рідкі аналіти у різноманітних умовах без необхідності проведення вимірів у лабораторії на стаціонарній установці – зокрема, дослідження водних зразків, крові, слини, контролю якості фармацевтичних препаратів, контролю і аналізу хімічних реакцій та промислових процесів.

РОЗДІЛ 1. ФІЗИЧНИЙ ПРИНЦИП РОБОТИ СЕНСОРНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ P-N-ПЕРЕХОДУ

1.1 Фотоелектричний принцип перетворення та елементи на його основі

Світлове випромінювання може вивільняти електрони з поверхні матеріалу – це явище називається фотоелектричним ефектом. Фотони, падаючи потоком на поверхню, передають енергію електронам у структурі цієї речовини. Після подолання певного енергетичного порогу, електрони отримують здатність здійснювати перехід із валентної зони у зону провідності. Таким чином, ми можемо перетворювати енергію світла для генерації електроенергії чи отримання корисного сигналу.

Фотоелементи – це пристрої, що здійснюють перетворення світлової енергії в електричну. Їхньою особливістю є здатність миттєво реагувати на зміни світлового рівня [5].

Фотоелектричний ефект має кілька основних видів:

1. Фотопровідний – під дією світла відбувається зміна провідності матеріалу. Ефект може бути зворотнім (при інтенсивнішому освітленні провідність збільшується) чи прямим (зменшення провідності зі збільшенням освітлення). Застосовується у фототранзисторах, фотодіодах.
2. Фотовольтаїчний – внаслідок освітлення поверхні, генерується напруга на виходах елемента [2]. Це відбувається внаслідок виникнення фотоелектричної ємності, що спричинює виникнення напруги. Зокрема, в сонячних елементах наразі можливо практично застосовувати лише фотовольтаїчний фотоелектричний ефект на p-n переході [3].

Фотодетекторами називаються такі фотоелементи, що використовуються для виявлення світла в оптичному діапазоні. Існують фотодетектори з різними принципами роботи, властивостями [4]. Але їх об'єднує те, що всі вони створюють сигнал відгуку у відповідь на світловий

потік для подальшої реєстрації чи обробки. Вони використовуються у датчиках освітленості, цифрових фотоматрицях, системах автоматизації освітлення, системах безпеки, лазерних сканерах, дослідженнях із використанням світлового випромінювання, для автоматизації, у складі фотореле разом з електричними підсилювачами тощо [5]. До фотодетекторів належать такі види компонентів:

- **Фотодіоди** – це фотодетектори на основі структури з одним р-п переходом. Фізичні процеси у фотодіоді під час опромінення його світлом наступні: у стані рівноваги по всій структурі рівень Фермі однаковий, а в області просторового заряду р-п-переходу існує внутрішнє електричне поле. Коли на структуру потрапляє світло з енергією кванту $\hbar\omega \geq \Delta E$, в області цього поля і поза ним виникають пари вільних носіїв заряду. Пари в області внутрішнього поля одразу ним розділяються, тоді як носії заряду на відстанях того ж порядку, що дифузійна довжина, по обидва боки від переходу розділяються після дифузійного переміщення в область поля. Основні носії залишаються в тій же області структури, де вони виникли, тоді як неосновні носії проходять через р-п-перехід. Через це, в n-області накопичуються електрони, а в р-області – дірки. Утворюється різниця потенціалів (фотоЕРС) U_{ph} , яка викликає зміщення р-п-переходу у прямому напрямку та знижує висоту потенціального бар'єра для дірок та електронів. Відбуваються паралельні процеси переміщення дірок з напівпровідника n-типу до напівпровідника р-типу, а електронів з р-типу до ділянки n-типу. Коли струм неосновних носіїв приходить до балансу зі струмом основних, встановлюється стаціонарний стан і виникає різниця потенціалів (фотоЕРС). Значення фотоЕРС U_{ph} залежить від потужності падаючого світлового потоку [4].

Фотодіод може вмикатись або в фотодіодному режимі (із зовнішньою зворотною напругою, також він називається

фотоперетворювальним), або у фотовольтаїчному (без зовнішньої напруги).

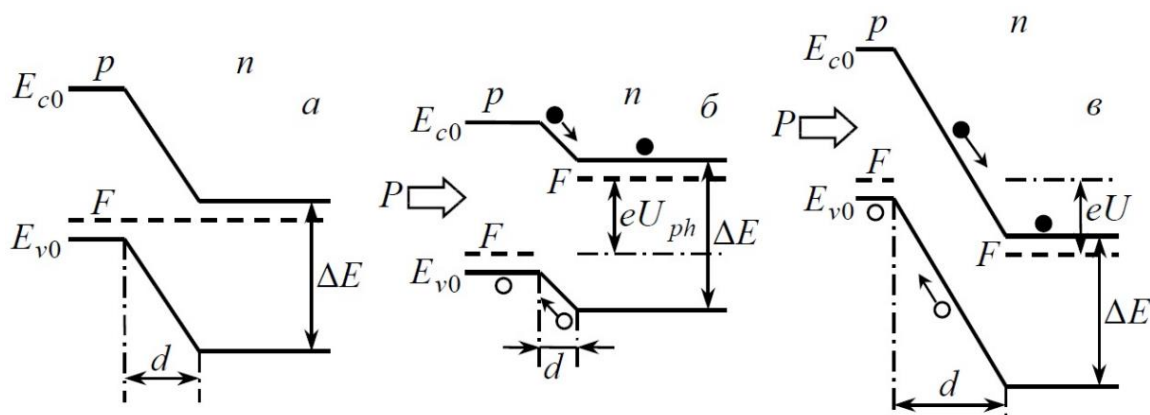


Рисунок 1. Зонні діаграми фотодіоду в (а) стані рівноваги, (б) фотовольтаїчному, (в) фотодіодному режимах [4]

- **Фототранзистори** – це напівпровідникові елементи, що складаються з двох р-п переходів. Вони перетворюють світловий потік в електричний струм. У корпусі фототранзистора є прозоре вікно для потрапляння світла на область бази. Напругу живлення потрібно подавати на колектор і емітер. Колекторний перехід в такому разі буде закритим, а емітерний відкритим [4].

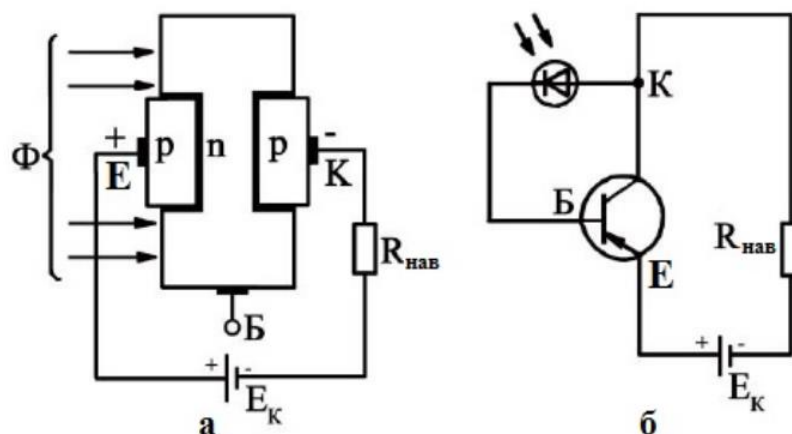


Рисунок 2. (а) Схема будови біполярного фототранзистора із вільною базою і (б) схема зв'язування фототранзистора [4]

- **Фоторезистори** – це може бути монокристалічна пластинка чи плівкова напівпровідникова структура на діелектрику, з металевими контактами.

Вони під'єднуються до джерела послідовно з опором навантаження, корисний сигнал вимірюється падінням напруги на ньому [4].

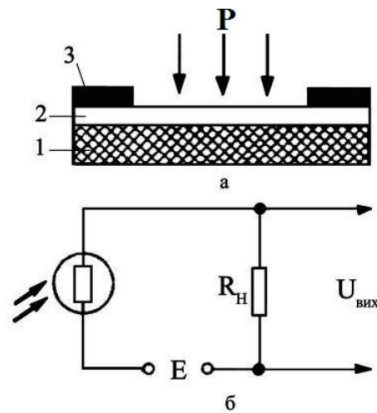


Рисунок 3. (а) Будова та (б) схема увімкнення фоторезистора: 1 - шар діелектрика, 2 - напівпровідникова монокристалічна плівка, 3 – контакти [4]

- **Фототиристори** – напівпровідниковий пристрій, що має чотирьохшарову р-п-р-п структуру. Поєднує властивості фотоприймача і тиристора, здійснює перетворення світлової енергії у електричну. Фототиристор відкривається при падінні світлового потоку на бази p_2 і n_1 через вікно, якщо освітлення відсутнє – то фототиристор закритий і по ньому приходить лише темновий струм [4].

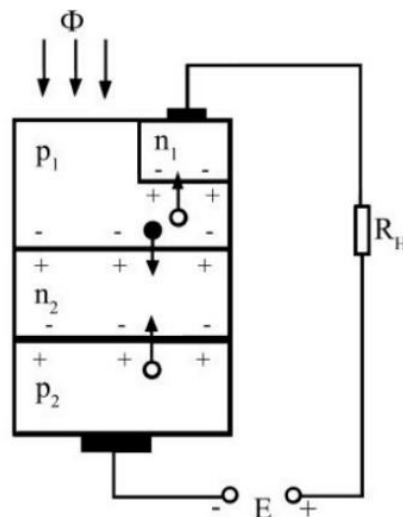


Рисунок 4. Схема фототиристора [4]

- **Оптоелектронна пара** (або оптрон) – це елемент, який складається з джерела і приймача випромінювання в одному корпусі. В якості джерела

світла часто використовується світлодіод, або ж інжекційний лазер. У назві оптрона вказується тип фотодетектора, що використовується (діодний, резисторний, транзисторний чи тиристорний). У всіх типів, крім резисторного, приймач сигналу робиться зі кремнію [4]. Оптиелектронна пара використовується для гальванічної ізоляції між колами, оскільки передача сигналу відбувається оптично.

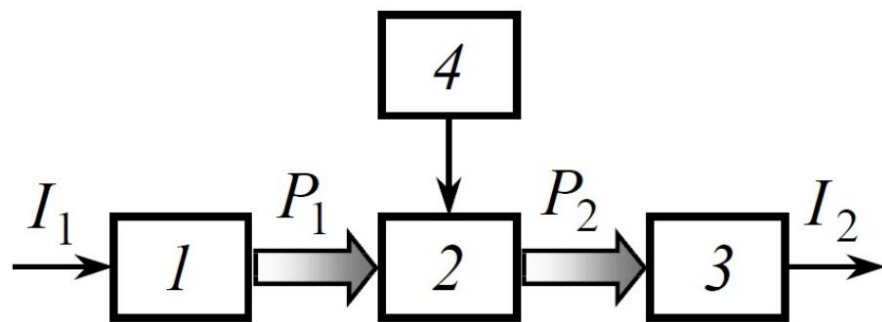


Рисунок 5. Схема будови оптрона: 1 – елемент випромінювання, 2 – оптичний канал, 3 – оптичний приймач, 4 – елемент керування [4]

1.2 Сенсорні структури з фотоелектричним принципом перетворення

1.2.1 Напівпровідникові хімічні сенсори

Основний підхід до створення хімічного сенсору на основі напівпровідникових структур полягає у використанні впливу адсорбції молекул аналіту на зарядовий стан поверхні. Фізичні властивості, якими визначається корисний сигнал такого сенсору, залежать від особливостей напівпровідникової структури та принципу перетворення, що у ній реалізується. Найбільш поширеними є прилади, що формують корисний сигнал завдяки зміні провідності елементу.

Фотоелектричне перетворення широко застосовується у потенціометричних сенсорах зі світловою адресацією (LAPS). Для цього використовується принцип зміни глибини зони просторового заряду у шарованій структурі електроліт-діелектрик-напівпровідник при освітленні сенсору [1].

1.2.2 Системи «електронного носу»

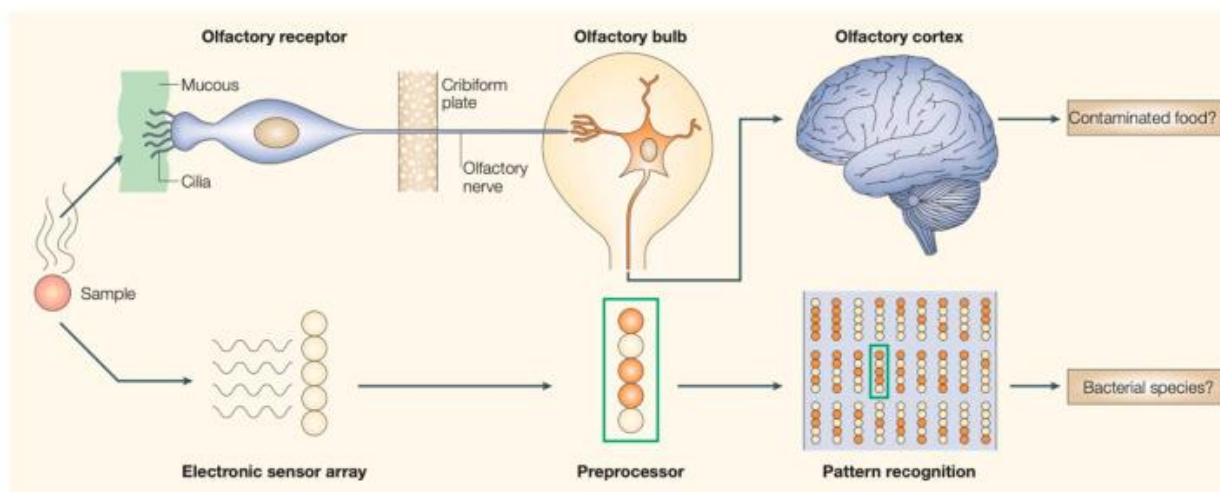


Рисунок 6. Принцип роботи «електронного носу» [6]

«Електронний ніс» – це масив хімічних сенсорів, з’єднаних із системою розпізнавання паттернів і системою семпсування. Ця технологія дозволяє визначати запахи за принципом, подібним до носових рецепторів людини. Різні запахи викликають різні відгуки у сенсорів, і сукупність цих сигналів дозволяє за його характеристикою встановити конкретний аромат. Це відбувається шляхом порівняння обробленого сигналу з масивом семплів, що складаються з багатовимірних мап відгуку. Наприклад, досліджуючи кілька зразків кави різних сортів і з різних країн, в ідеальних умовах ми можемо отримати групу точок даних для кожної кави. Зі збільшенням кількості зразків, роздільність між групами збільшуватиметься. Якщо ми після цього проаналізуємо невідомий зразок за допомогою тієї ж карти значень відомих видів кави, ми зможемо визначити, до якої з груп досліджуваний зразок найближчий [7].

У статті [6] робиться огляд останніх досягнень в застосуванні машинного навчання у технології «електронного носу» та розглядаються нові напрямки дослідження у алгоритмах екстракції ознак, моделюванні і компенсації дрейфу сенсора. Методи машинного навчання дозволяють «електронному носу» набагато точніше ідентифікувати запахи, і працювати як

з якісними, так і кількісними параметрами. Таке підвищення ефективності значно розширює можливі застосування технології, зокрема у робототехніці, харчовій інженерії, моніторингу стану навколишнього середовища, медичній діагностиці [6].

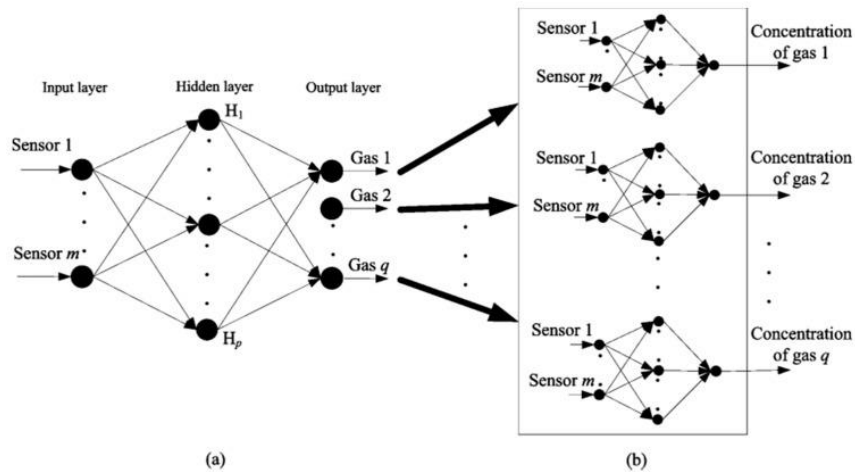


Рисунок 7. Структура алгоритмів оцінки концентрації (а) SMIMO- і (б) MMISO-based MLP [6]

Останнім часом було розроблено та інтегровано безліч алгоритмів машинного навчання в процес екстракції ознак, моделювання та компенсації дрейфу газового сенсора. Екстракція ознак робиться з метою збереження точної інформації про зразки у вихідному сигналі, з відфільтрованими надлишковими сигналами і шумом. Із якісно обробленою інформацією про ознаки, добре підібраний метод моделювання ефективно використає її для передбачення. Компенсація дрейфу також підвищує точність вимірювань [6].

Існує кілька типів сенсорів, що застосовуються у системі «електронного носу». Для хімічного виявлення газоподібних сполук можуть використовуватись електрохімічні, хеморезистивні, п'єзоелектричні та оптичні сенсори.

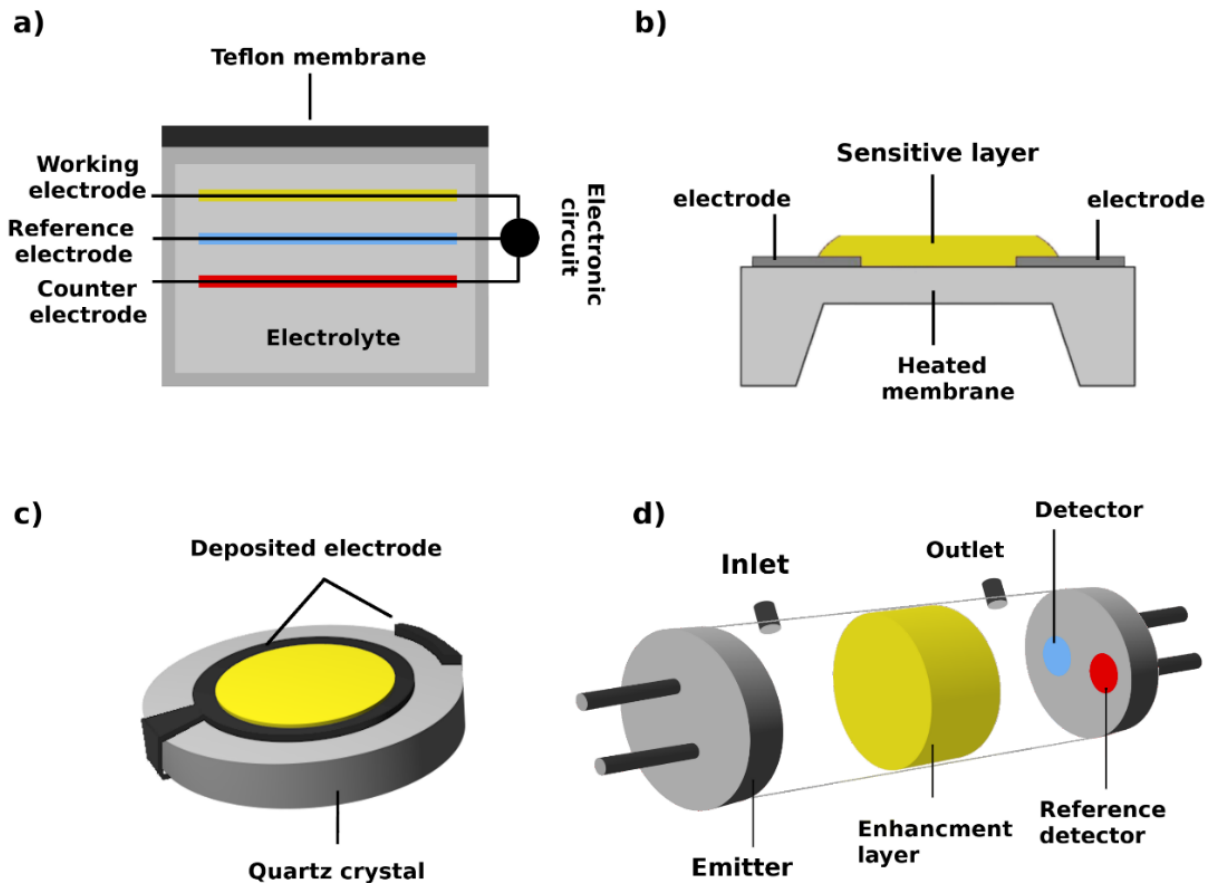


Рисунок 8. Принципи роботи різних типів газових сенсорів в "електронному носі": (a) електрохімічний, (b) хеморезистивний, (c) п'єзoeлектричний, (d) оптичний [8]

Електрохімічний сенсор (рис.8, а) включає три електроди: робочий, опорний і контрольний. Принцип такого сенсору базується на змінах струму внаслідок відновлення чи окиснення потрібних молекул на поверхні робочого електрода. Зміни в потоці струму пропорційні концентрації газу, що вимірюється. Такий тип сенсора має високу селективність і чутливість, однак має обмеження щодо молекул, які можуть бути ним виміряні (наприклад, SO_2 , NO_2 , NH_3 , H_2S , $HCHO$, глутаральдегід).

Хеморезистивні газові сенсори (рис.8, b) мають відносно просту будову – чутливий шар нанесений між двома електродами, взаємодія газів з ним призводить до зміни опору сенсора завдяки обміну носіями заряду.

П'єзoeлектричний сенсор (рис.8, c) побудований на основі кварцового кристала та його п'єзoeлектричних властивостей. Кристал коливається під

дією напруги між двох золотих електродів, один з яких покритий чутливим шаром. Його резонансна частота змінюється при абсорбції газу модифікованою поверхнею електрода.

Оптичний сенсор (рис.8, d) для системи «електронного носу» складається з джерела світла, сенсорної структури, світловодів та світлового детектора. Принцип роботи заснований на взаємодії світла зі сенсорним шаром до та після контакту з цільовими газовими молекулами. У присутності потрібних аналітів може відбуватися зміна інтенсивності світла або зсув довжини хвилі [8][9].

1.2.3 OBIC-мікроскопія

Лазерна скануюча мікроскопія з оптичним пучком, що індукує струм (LBIC/OBIC, laser beam-induced current/optical beam-induced current) є потужною неінвазивною альтернативою іншим методам дослідження поверхневих властивостей, наприклад таким як електронно-пучкова спектроскопія (EBIC). Вона дозволяє отримувати високу роздільну здатність результату. В основі OBIC лежить генерація електронно-діркових пар у зразку завдяки скануванню сфокусованим лазерним променем із енергією, що рівна або перевищує енергію ширини забороненої зони. Паралельно відбувається синхронізована детекція рівня струму з врахуванням положення променя у цей момент [10].

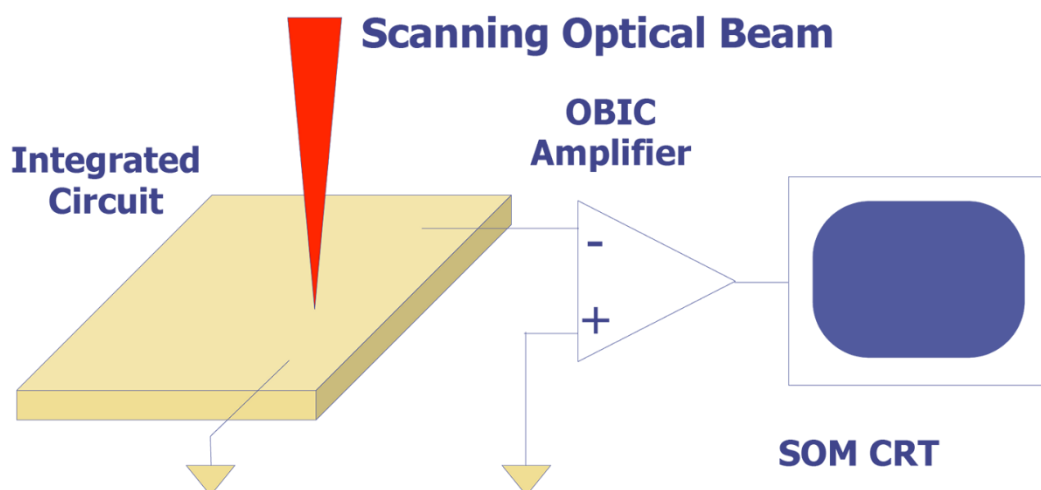


Рисунок 9. Принцип роботи OBIC [11]

OBIC можна використовувати для локалізації дефектних місць, спричинених метал-напівпровідниковою дифузією чи електростатичним розрядом. Сенсори за цією технологією можуть визначати параметри та фактори, що впливають на надійність і ефективність електронних пристроїв, що тестуються. У статті [10] розглядаються базові принципи OBIC мікроскопії, її застосування для дослідження характеристик напівпровідникових пристроїв. Зокрема, оглядаються нові принципи OBIC-сканування, такі як неперервна лазерна однофотонна OBIC, пульсуюча лазерна однофотонна OBIC і мультифотонна OBIC мікроскопія для тривимірної мапи фотострумів відгуку.

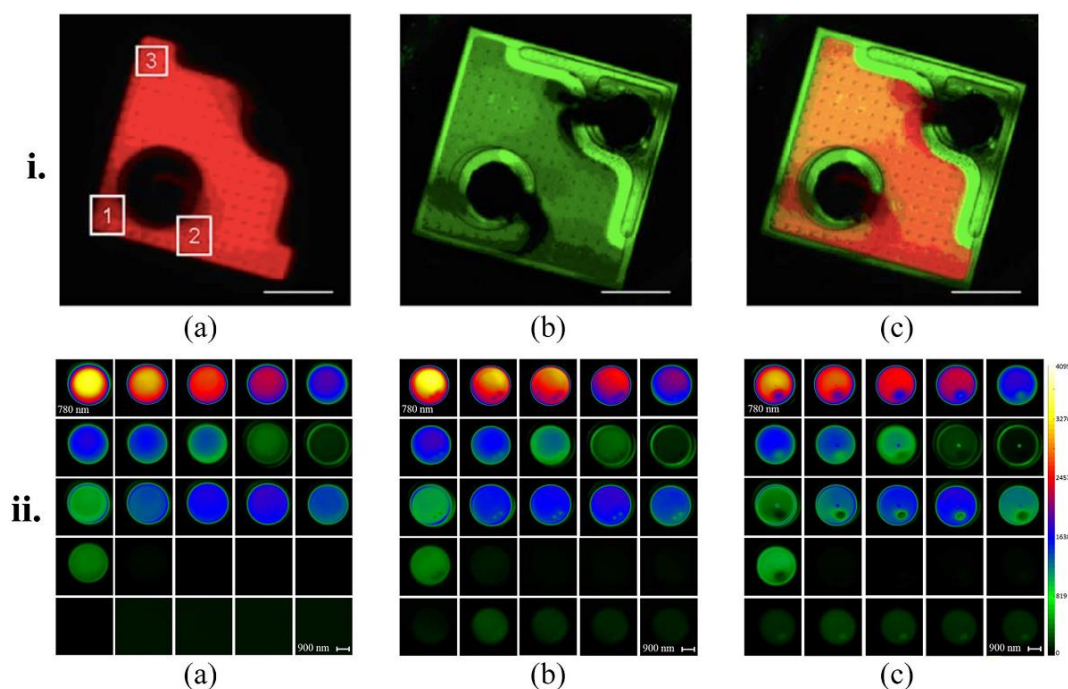


Рисунок 10. Приклад візуалізації сканування поверхні 600nm світлодіоду за допомогою OBIC [10]

LBIC (засвітка за допомогою лазера) з інтегрованими каналами також може використовуватись для аналізу спиртів. У статті [12] проаналізовано вплив адсорбції молекул спирту на чутливість сенсору. Було розроблено прототип портативної системи для визначення вмісту фенольних сполук у спиртових розчинах, і показано, що такі сенсори можуть бути інтегровані в автоматизовану систему моніторингу якості напоїв бродіння. Сенсор дозволяє

визначити концентрації ваніліну та сиригальдегіду, а досліджувані аналіти викликають унікальні відгуки сенсору для кожного каналу. Мультиканальна система сенсору була відкалібрована за допомогою хроматографічного аналізу в якості еталону. У статті обговорено застосування мультиканального фотовольтаїчного перетворювача для розпізнавання ароматів.

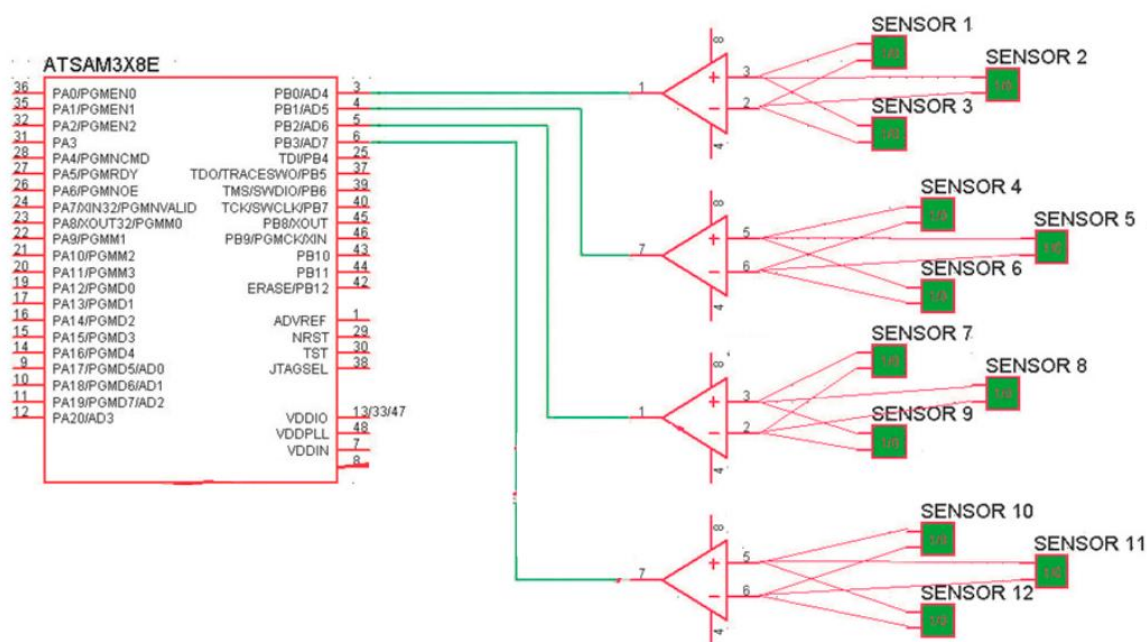


Рисунок 11. Мультиканальний АЦП і мультиканальна система сенсорів [12]

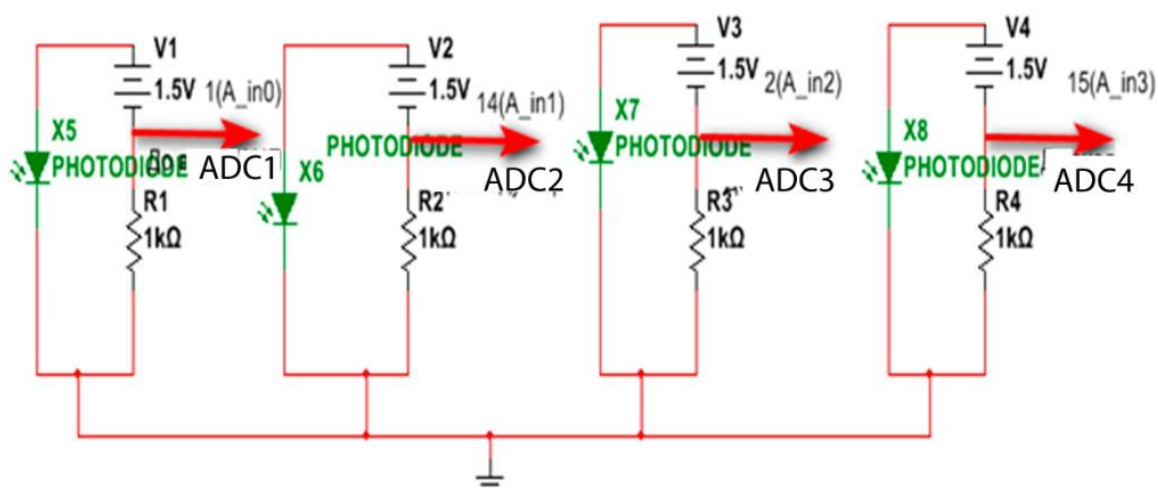


Рисунок 12. Еквівалентна схема 4-канального сенсору з р-п-переходом [12]

1.3 Рекомбінаційний фотоелектричний сенсор

Процес поверхневої рекомбінації чутливий до впливу речовини на поверхні сенсору – рекомбінаційні характеристики можуть змінюватись через адсорбцію. Принцип роботи таких структур базується на зміні ефективних швидкостей рекомбінації завдяки впливу локального електричного поля адсорбованої речовини на приповерхневий вигин зон та параметри рекомбінаційних центрів [13]. У статті [1] досліджується можливість використання цього ефекту у якості основного принципу роботи хімічного сенсору з фотоелектричним принципом перетворення. У ній визначаються параметри переходу, що дозволяють отримати максимальну амплітуду корисного сигналу (тобто зміну фотоструму через р-п перехід) як наслідок адсорбції полярних молекул аналіту.

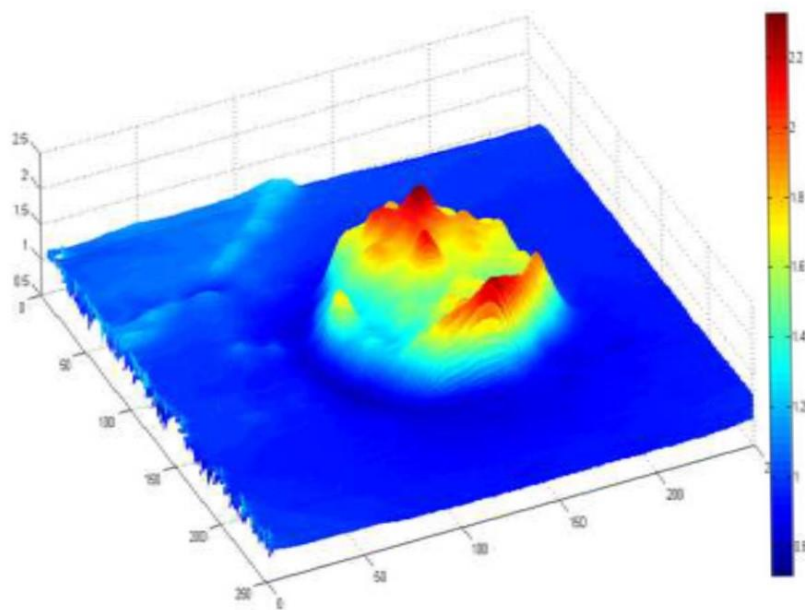


Рисунок 13. Сканування кремнієвого рекомбінаційного фотосенсору за допомогою лазера, тривимірний графік залежності зміни фотоструму на поверхні під впливом аналіту

Рівень сигналу (тобто фотострум) залежить від концентрації молекул аналіту, оскільки вони впливають на рекомбінаційні параметри поверхні зразка [1].

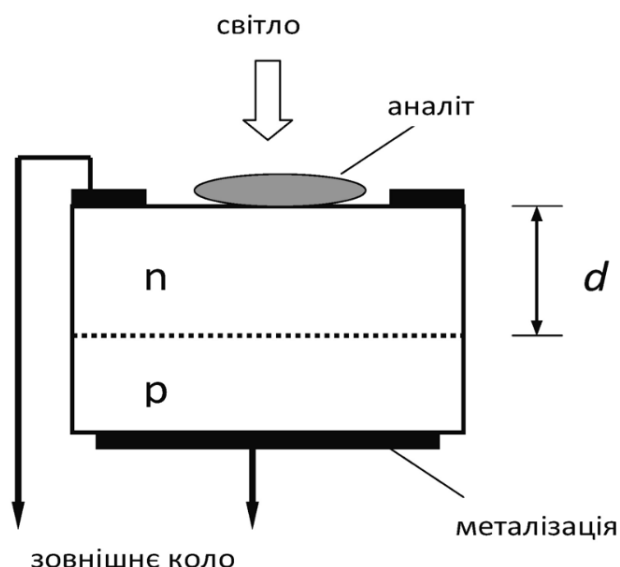


Рисунок 14. Сенсорна структура на основі «глибокого» р-п переходу [1]

У статті [13] продемонстровано, що ефективність сенсорних структур на основі «глибоких» кремнієвих р-п переходів може мати сильну залежність від типу електричної провідності області, що освітлюється.

Такі сенсорні структури на основі рекомбінаційного сенсору можуть застосовуватися для виявлення активності трансаміназ (ALT/AST) у плазмі крові в реальному часі [14]. Для цього вимірюється фотострум через структуру з внутрішнім бар'єром при освітленні зразка світлом із високим коефіцієнтом поглинання. Детекція здійснюється завдяки специфічним хімічним реакціям, каталізованим ферментами ALT і AST (α -кетоглутарат + аспартат та α -кетоглутарат + аланін). Зміна ефективного заряду реагентів дозволяє реєструвати активність ферментів через вплив на рекомбінацію. Фізичний принцип роботи сенсору можна пояснити в рамках теорії Стівенсона, беручи до уваги зміни у вигині приповерхневих зон, переріз області захоплення та положення енергетичних рівнів рекомбінації під час адсорбції [14].

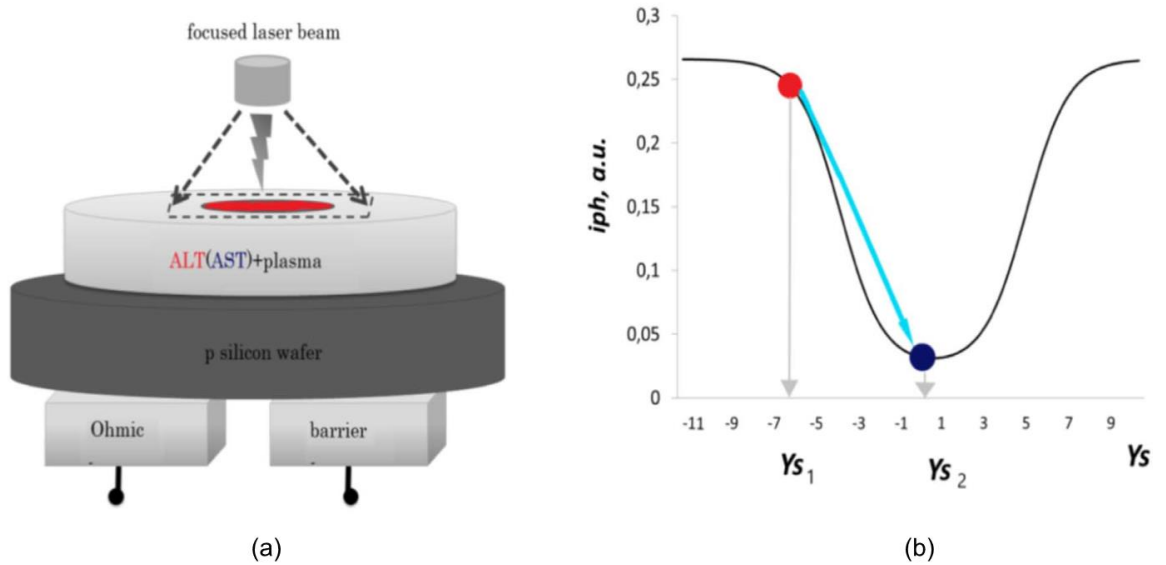


Рисунок 15. (а) Схематичне зображення сенсорної структури, (b) залежність фотоструму від поверхневого вигину зон для кремнію р-типу (синьою стрілкою зображено можливий процес адсорбції) [14]

Для створення сенсорної структури було використано кремнієвий субстрат р-типу із опором 30-50 Ом та (100) орієнтацією. Поверхня сканується лазером із довжиною хвилі $\lambda = 532 \text{ nm}$ матрицею 512x512 точок.

Оскільки фотострум сильно залежить від змін рівня поверхневої рекомбінації, товщина області бази d має бути близькою до дифузійної довжини l чи перевищувати її. Стандартна товщина кремнієвих пластинок становить $300 \mu\text{m}$, що знаходиться в допустимих межах, оскільки

$$d \sim l = (D\tau)^{1/2} \sim 150 \div 300 \mu\text{m} \gg 1\alpha(\lambda) \sim 0.07 \mu\text{m}$$

(де τ – час життя, D – коефіцієнт дифузії) [18].

У процесі моделювання було встановлено, що частота модуляції сигналу понад 15-20 кГц може значно знижувати ефективність детекції. Амплітуда флуктуацій концентрації надлишку носіїв заряду зменшується зі зростанням частоти через рекомбінацію та дифузійну природу поширення носіїв заряду. Окрім цього, зі збільшенням частоти стає менш помітним вплив швидкості поверхневої рекомбінації на фотострум, тому зменшується значення $i(s_1)/i(s_2)$ (ця залежність зображена на рис.16). Оптимальними рівнями частоти

модуляції можна вважати 1-5кГц, однак на практиці вибір частоти не завжди чіткий і однозначно визначений, слід враховувати типи аналітів і особливості реалізації системи [14].

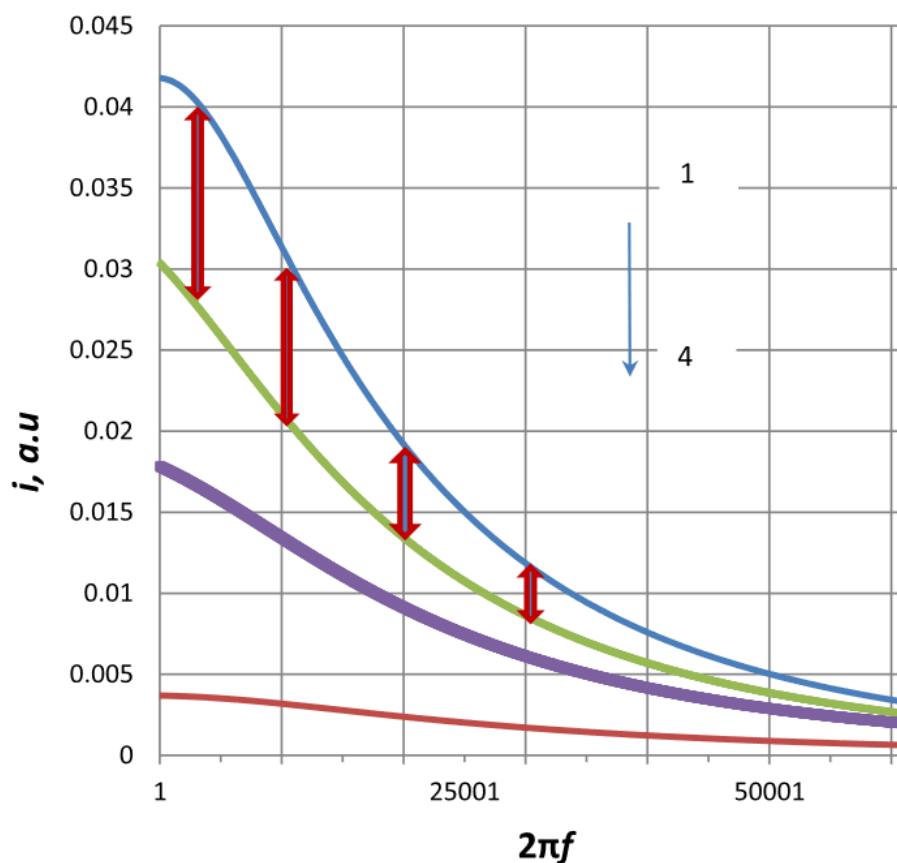


Рисунок 16. Залежність фотоструму на сенсорній структурі від частоти модуляції. Криві відповідають різним значенням поверхневої рекомбінації (10см/с, 500см/с, 2000см/с, 10000см/с). Стрілками позначені переходи пов'язані з адсорбцією [14]

Загалом, використання сенсорів, що створюють корисний сигнал на базі зміни ефективної швидкості рекомбінації є актуальним, бо такі пристрої мають простішу будову ніж OAPS-структури та одночасно більш широкі потенційні застосування [13].

Завданням для подальшого розвитку такого типу сенсору є досягнути більших змін фотоструму (а отже змін корисного сигналу) як наслідку адсорбції полярних аналітів, що призводять до зміни швидкості поверхневої

рекомбінації [13]. Саме для такого типу сенсору ми розроблятимемо систему підсвітки у цій роботі.

1.4 Шуми при фотодетектуванні

У процесі фотодетектування, окрім корисного сигналу виникають шуми, що поділяються на кілька видів. До фундаментальних (тобто постійних) шумів відносяться теплові та дробові шуми.

Тепловий шум (або джонівський шум/шум Найквіста) з'являється через хаотичний тепловий рух носіїв заряду. Через це на кінцях омичного опору з'являється напруга, яку можна середньоквадратично визначити за формулою Найквіста:

$$U_n^T = \sqrt{4kT\Delta f R_i}$$

де Δf – ширина смуги частот, R_i – внутрішній опір фотодетектора

Тепловий шум має рівномірний спектр до частот близько 100ГГц.

Дробовий шум (шум Шотткі) спричинюється тим, що струм є потоком дискретних частинок із зарядом. Це створює на навантаженні R додаткову шумову напругу з середньоквадратичним значенням:

$$U_n^I = R\sqrt{2eI\Delta f}$$

де I – середнє значення струму

Спектр дробового шуму також є рівномірним.

Фотонний шум виникає через флуктуації кількості фотонів, що попадають на фотодетектор за одиницю часу. Це пов'язано з дискретністю фотонів у потоці [4].

РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПУ СЕНСОРУ НА ОСНОВІ LED-МАТРИЦІ

2.1 Постановка задачі

Установка для дослідження кремнієвих сенсорних фотоелектричних структур, що працює зараз, використовує для отримання скануючого освітлення поверхні зразка напівпровідниковий лазер із довжиною хвилі $\lambda = 532nm$ та акустoeлектричною системою позиціонування, яка дозволяє отримувати результат сканування з високою роздільною здатністю. До недоліків такої системи відносяться складність будови пристрою, вартість компонентів та низька мобільність установки.



Рисунок 17. Лазерна установка для дослідження фотоелектричного сенсору

Ця робота описує процес створення пристрою з фотоелектричним сенсором для дослідження рідких полярних аналітів, в основі якого буде використовуватися світлодіодна матриця. Така система матиме значно меншу

роздільну здатність сканування (вона становитиме 8x8 точок), однак забезпечуватиме більшу мобільність, простоту створення і налаштування, а також може бути у майбутньому покращена, зокрема масштабуванням роздільної здатності сканування, тестуванням нових алгоритмів обробки сигналу тощо.

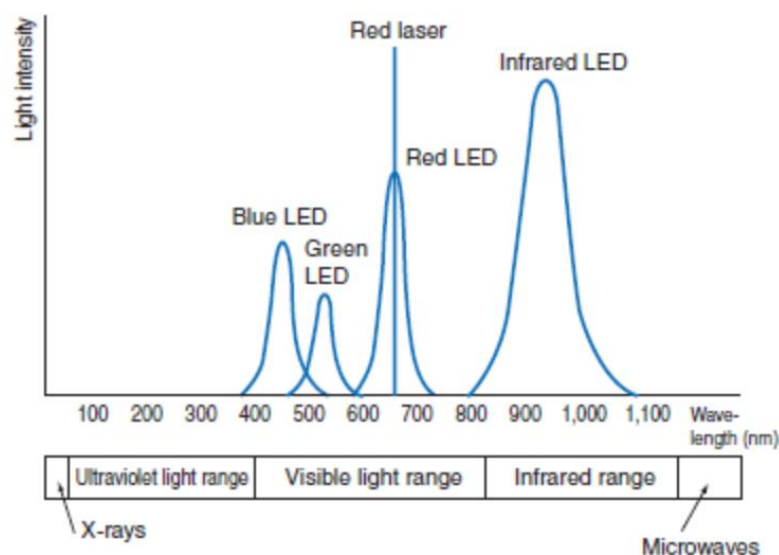


Рисунок 18. Спектри різних джерел світла для фотоелектричних сенсорів, зокрема червоного лазера і червоного світлодіоду [15]

До готової системи, у процесі роботи над нею, ми ставимо такі завдання:

- **керування інтенсивністю світіння за допомогою струму:** найчастіше димування світлодіодів здійснюється завдяки широтно-імпульсній модуляції. Такий спосіб дозволяє отримати дуже енергоефективну роботу, але також продукує мерехтіння освітлення. На достатньо високій частоті (від 500Гц) модуляція не помітна для ока, а при ще вищих значеннях практично не фіксується сенсором камер. Однак, для нашого пристрою необхідно забезпечити стале світіння світлодіодів, оскільки амплітудна модуляція використовуватиметься для диференціації вихідного сигналу від шумів. Тому в нашій системі потрібно керувати інтенсивністю без використання ШІМ. Завданням є отримати не менше 10 дискретних рівнів інтенсивності світіння

- **амплітудна модуляція:** для фільтрації корисного сигналу засвітки сенсора матрицею від фоновому шуму, використовуватимемо модуляцію за амплітудою – світлодіод засвічуватиме поверхню з певною частотою прямокутними імпульсами, а приймаюча частина за допомогою програмного бенд-пас фільтру виділятиме цей сигнал. Для пошуку оптимальних частот, які забезпечуватимуть найкращий рівень сигналу, пристрій матиме можливість регулювання частоти модуляції в діапазоні до 430Гц (таке верхнє обмеження частоти накладається характеристиками семпсування використаного чіпу АЦП).
- **підтримка програмованих алгоритмів сканування:** контролер вмикатиме світлодіоди послідовно від першого до останнього для сканування поверхні зразка, а також реверсивний алгоритм сканування, сканування з усередненням та інші
- **синхронізація сканування вихідного сигналу і підсвітки:** імпульси модуляції мають відповідати періодам сканування сигналу зі зразка

2.2 Структура вимірювальної системи

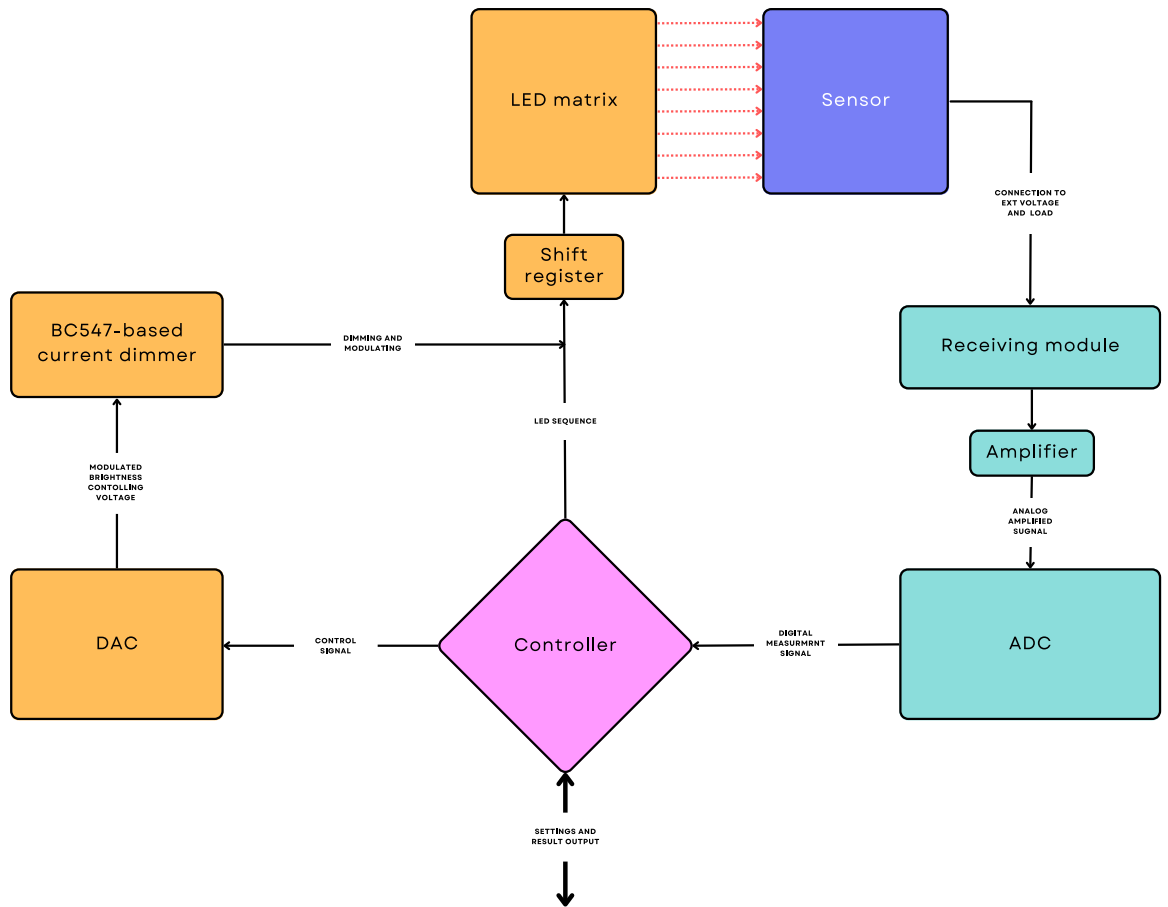


Рисунок 19. Блок-схема роботи системи

Пристрій складається із єдиного контролера і двох груп елементів: системи освітлення і системи обробки сигналу.

До групи **системи освітлення** входять такі елементи:

- Цифро-аналоговий перетворювач, що генерує керуючу напругу димування
- Елемент димування на базі n-p-n-транзистора
- Регістри зсуву
- Світлодіодна матриця

Група **системи обробки сигналу** включає:

- Модуль приймання сигналу, що складається з джерела зовнішньої напруги для зразка та опору навантаження
- Підсилювач вхідного сигналу [16]
- АЦП

Контролер задає керуючий інтенсивністю (та модульований) сигнал на ЦАП, який в свою чергу перетворює його на керуючу напругу для встановлення рівня інтенсивності за допомогою n-p-n-транзистора BC547 [17]. Оскільки сигнал керування ЦАП модульований, ця частина схеми виконує також і роль модулятора, задаючи частоту модуляції активного у цей момент світлодіоду матриці. Також контролер керує секвенцією вмикання світлодіодів, запалюючи їх по черзі на заданий проміжок часу для поступового сканування. Паралельно мікроконтролером здійснюється зчитування результату вимірювання з АЦП та виведення результатів по каналу зв'язку.

2.3 Способи реалізації схеми керування матрицею

2.3.1 Порівняння ШІМ і аналогового керування інтенсивністю світлодіодів

Найпопулярнішим методом керування інтенсивністю світлодіодів є широтно-імпульсна модуляція. Його суть полягає у тому, що контролером генерується серія імпульсів змінної ширини. Світлодіод вмикається і вимикається на проміжок часу, що відповідає ширині імпульсу. Ці перемикання відбуваються на достатньо високій частоті, щоб вони були нерозрізними для людського ока, і досягається ефект зміни інтенсивності пропорційно ширині заповнення сигналу імпульсами.

Ще одним способом змінювати інтенсивність світлодіодів є аналогове керування [18]. Оскільки світлодіоди є пристроями, що керуються струмом, а не напругою, відповідно рівень інтенсивності випромінення також визначається струмом поданим на них. Для цього можна використати джерело струму, що керуватиметься напругою (наприклад, це можна робити за допомогою ЦАП). В такому разі, не буде необхідності модулювати світловий потік для зміни інтенсивності, однак цей спосіб також має свої особливості. Порівняння цих двох типів керування інтенсивністю наведено у таблиці 1.

Табл 1. Порівняння методів аналогового керування інтенсивністю світлодіодів та керування за допомогою ШІМ

Властивість	Аналогове керування	ШІМ
Принцип роботи	Регулювання рівня струму на світлодіоді, що визначає інтенсивність світіння	Зміна інтенсивності увімкненням і вимкненням світлодіоду за допомогою модуляції ширини імпульсів
Ефективність	Більші втрати енергії та менша ефективність	Дуже висока ефективність завдяки імпульсному принципу роботи
Роздільна здатність	Залежно від характеристик ЦАП, контролера і решти компонентів	Висока, завдяки можливості дуже точно змінювати ширину імпульсів
Вплив шуму та стабільність	Аналоговий принцип системи більш вразливий до впливу зовнішніх умов, шумів і перешкод	Менший вплив завдяки високочастотній модуляції
Лінійність	Регулювання інтенсивності нелінійне через нелінійність залежності інтенсивності світлодіоду від сили струму	Керування дуже лінійне завдяки точності керування імпульсами
Довговічність	Стабільний струм позитивно впливає на збереження світлодіодів	Більш негативний вплив на ресурс світлодіодів через часте вмикання і вимикання

Простота системи	Потрібні ЦАП, кероване джерело струму і мікроконтролер	Достатньо контролера, що має здатність генерувати ШІМ-сигнал
Мерехтіння	Відсутнє, завдяки неперервності струму	Присутнє на частоті роботи ШІМ
Кольорова передача	Зсув кольорів при зміні сили струму	Стабільний колір світіння завдяки сталому струму

Оскільки наша установка передбачає використання модуляції сигналу для компенсації постійної складової світлового потоку і шумів, ми на етапі постановки завдання визначаємо, що використовуватимемо метод аналогового керування інтенсивністю.

2.3.2 Керування секвенцією матриці

Кількість світлодіодів у матриці значно більша за доступні піни мікроконтролера. Оскільки одночасно нам потрібно засвічувати не більше одного світлодіоду, ми можемо реалізувати керування матрицею за принципом мультиплексування сигналу.

Мультиплексування - це техніка керування багатьма світлодіодами, яка використовується для роботи зі світлодіодними матрицями, що використовується для зменшення необхідної кількості пінів керування. Замість керування кожним світлодіодом як окремим пристроєм, принцип роботи мультиплексування полягає у об'єднанні анодів та катодів світлодіодів за рядками та стовпчиками, та активації одного рядка і стовпчика для вмикання необхідного світлодіоду [19].

2.4 Моделювання і 3D-друк компонентів для установки

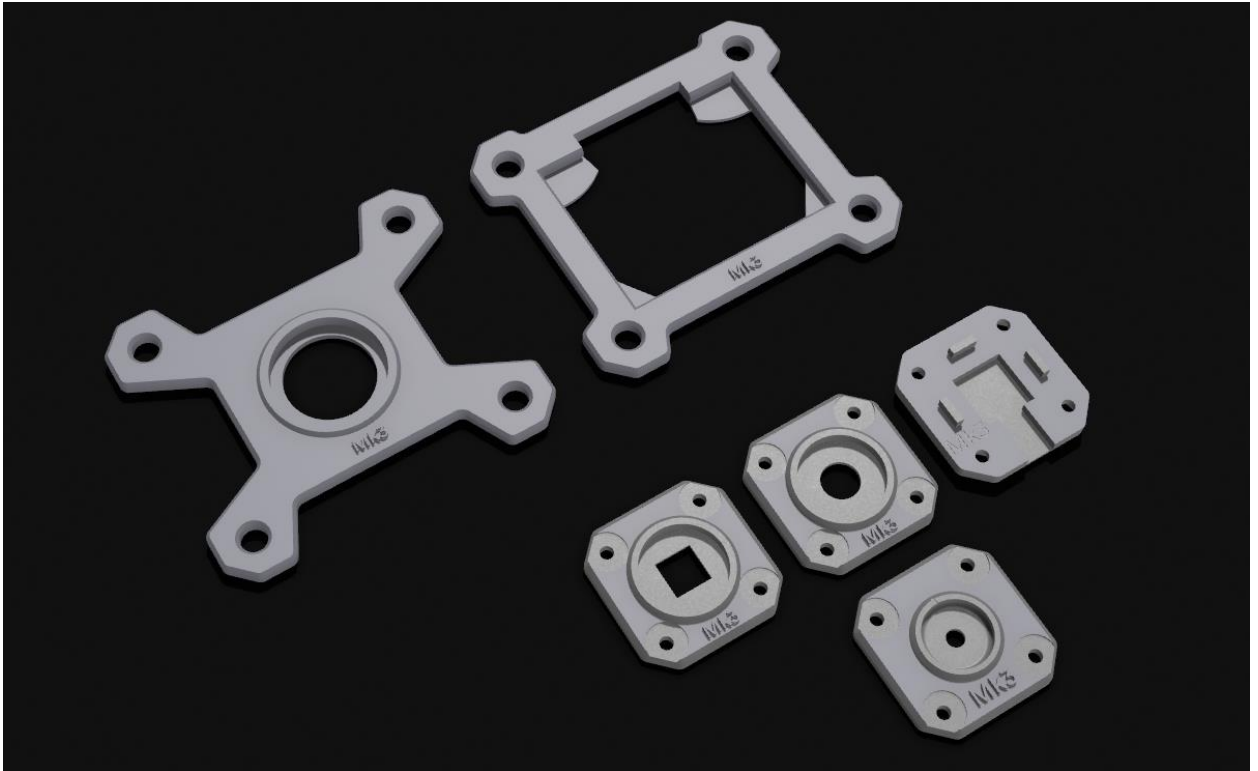


Рисунок 20. Змодельовані і виготовлені FDM 3Д-друком елементи системи

Для фіксації кремнієвого зразка та створення герметичного контакту його поверхні з аналітом, ми змодельовали кювету для сенсору у програмі Shapr3D і виготовили її за допомогою FDM 3D-друку. Кювета складається з нижнього і верхнього елементів. На нижній частині розміщено майданчик для текстолітової контактної підкладки (на яку фіксується сам зразок за допомогою провідної пасти) і канал для контактних виводів. На верхній половині змодельована ємність для досліджуваного аналіту, освітлювальне вікно та посадкове місце для ущільнювача, що герметизує ємність з аналітом навколо місця контакту з поверхнею зразка.

Усього було створено три модифікації верхньої частини кювети: перша має кругле вікно освітлення діаметром 7мм та використовується для вимірів за допомогою лазера на початковій установці.

Друга і третя кювети створені для використання з портативною системою побудованою навколо світлодіодної матриці. Одна з них має кругле вікно діаметром 15мм, друга – квадратне зі стороною 15мм. Перевагою кювети

з круглим вікном є легший пошук ущільнювача для герметизації, тоді як квадратна забезпечує більшу площу освітлення зразка.

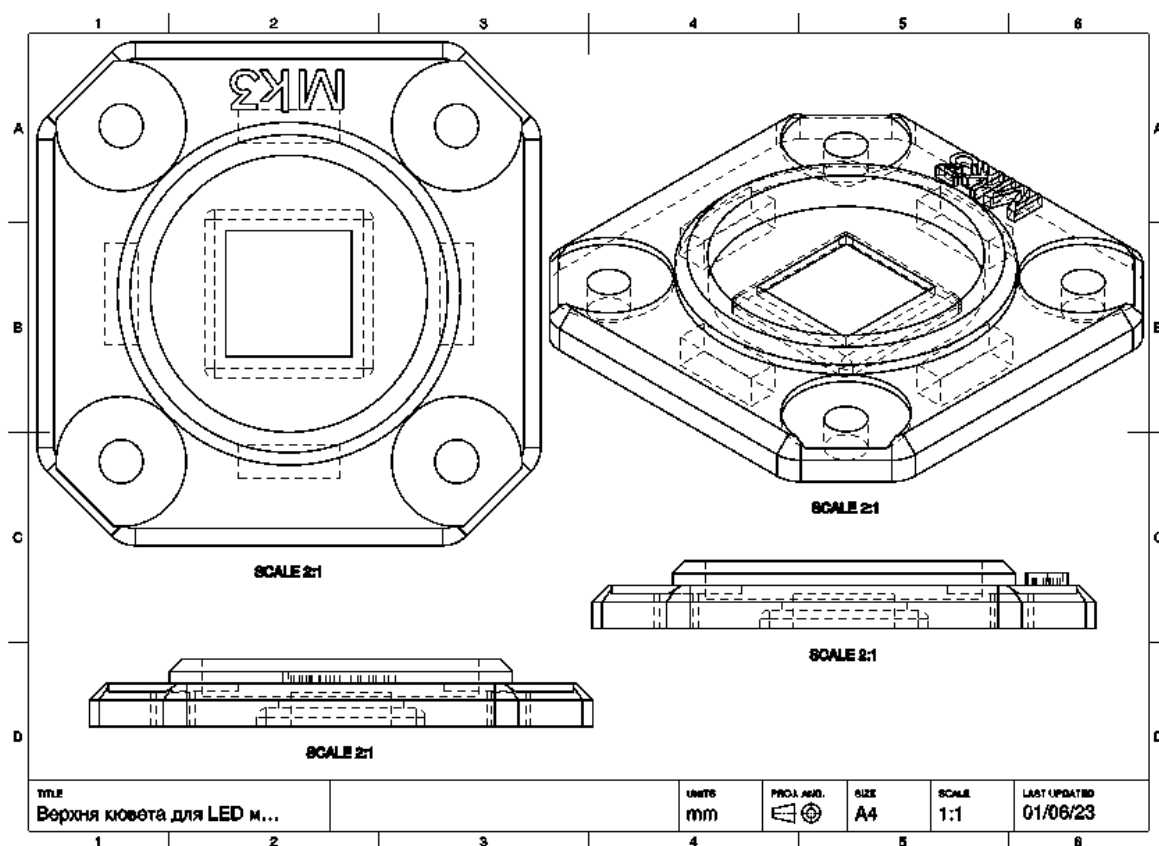


Рисунок 21. Креслення верхньої половини кювети

З використанням того ж методу виготовлення, були створені корпус для модулю освітлення та корпус для фіксації додаткової лінзи. Її використання необхідне для зменшення проекції матриці до розмірів світлового вікна, оскільки воно зроблено меншим за габарити зразка та матриці (через необхідність забезпечити по периметру простір для ущільнювача). Матриця і лінза закріплюються на чотирьох осях відносно кювети для точного позиціонування.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ СХЕМИ

3.1 Технічний огляд і вибір компонентів

3.1.1 Світлодіодна матриця

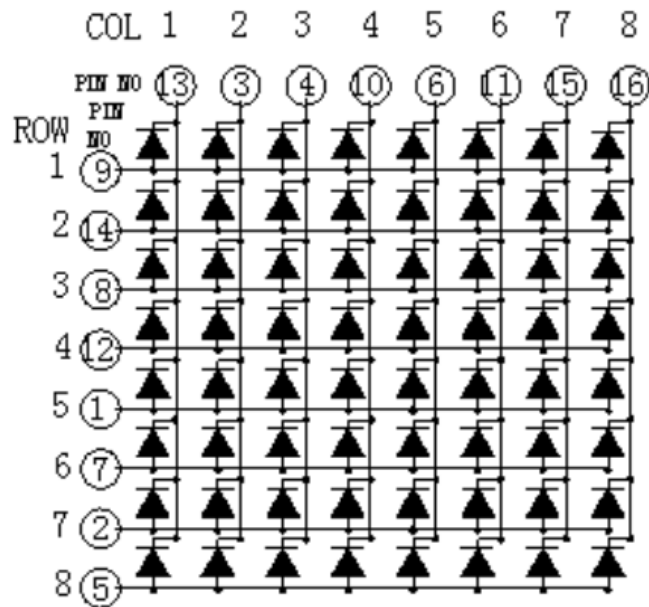


Рисунок 22. Схема матриці [20]

У модулі матриці, який ми використовуватимемо в установці, вже реалізовані мультиплексні виходи (8 контактів рядків і 8 контактів стовпчиків [20]. Таким чином, ми зможемо зменшити кількість необхідних ліній керування матрицею з 64 до 16 (а в подальшому зменшити до 6 завдяки регістрам зсуву).

Кількість вихідних пінів мікроконтролеру обмежена, тому використаємо для керування матрицею регістри зсуву 74HC595N. Це також зменшить кількість необхідних каналів зв'язку між модулем освітлення і контролера. Для цього об'єднаємо два регістри зсуву у ланцюжок.

До виводів світлодіодів підключаємо транзистори BC547, що керуватимуть увімкненням стовпчиків (подаватимуть на світлодіоди струм від блоку димування, керуючись контролером)

3.1.2 Модулятор

Блок модулятора спочатку планувалось створити на основі окремого мікроконтролера Arduino. Тоді завдяки можливості програмувати модуль, ми зможемо змінювати частоту модуляції та крок між імпульсами, а також за потреби використовувати інші форми імпульсу, окрім прямокутних. Його б ми могли під'єднати до МОСФЕТ-транзистора, що модулюватиме струм між блоком димування і матрицею.

Однак, замість модулювання сигналу за допомогою МОСФЕТ-транзистора і окремого мікроконтролера, ми використаємо здатність ЦАП здійснювати швидкі перемикання вихідної напруги, та модулюватимемо сигнал поданням модульованої напруги разом з сигналом димування. Таким чином, програмне модулювання відбуватиметься в межах єдиного мікроконтролера ESP32. Це стане перевагою також при обробці вхідного сигналу вимірювання, бо не буде необхідності у синхронізації окремих мікроконтролерів.

3.1.3 Цифро-аналоговий перетворювач і керування інтенсивністю

Для задання керуючої напруги на транзистор BC547, використаємо **12-бітний модуль ЦАП MCP4725** [21]. Він може подавати на виході аналоговий сигнал на рівні від 0В до рівня напруги з джерела (у випадку з Arduino – до 5В, для ESP32 це значення становить 3.3В) і керується за інтерфейсом I_2C [22].

3.1.4 Мікроконтролер

Оскільки контролер у схемі виконуватиме кілька ролей одночасно, в його якості замість Arduino використовуватимемо плату на базі мікрочіпу ESP32 WROOM-32 CH340. Її перевагами є значно більша обчислювальна потужність, пам'ять, а також вбудований двоканальний 8-бітний ЦАП та протоколи бездротового зв'язку, що дозволять в подальшому реалізувати бездротову передачу результатів вимірювання без додаткових компонентів.

Використання цього контролера дозволяє досягти того, що за певних умов ми можемо не застосовувати дискретний ЦАП (якщо не знадобиться більше градацій інтенсивності освітлення), а також завдяки значно вищій обчислювальній потужності ESP32, ми можемо об'єднати контролери освітлюючої матриці і приймаючої сигнал частини в один пристрій та не мати необхідності робити синхронізацію роботи двох окремих плат. Ще однією перевагою є збільшення кількості пінів для комунікації з рештою схеми.

Табл 2. Порівняння ESP32 WROOM-32 CH340 і Arduino Nano

Характеристика	ESP32 WROOM-32 CH340	Arduino Nano
Мікроконтролер	ESP32 SoC (System-on-Chip)	ATmega328P
Архітектура	Двоядерний мікроконтролер Xtensa LX6	AVR
Робоча частота	До 240МГц	16МГц
Пам'ять	4МБ флеш-пам'яті, 520КБ RAM	32МБ флеш-пам'яті, 2КБ RAM
Входи/виходи	34 цифрових входів/виходів, 18 аналогових входів	22 пінів цифрових входів/виходів, 8 аналогових входів
Інтерфейси	2 шини I ₂ C, 2 шини SPI, 2 шини I2S, 3 UART	I ₂ C, SPI, UART
АЦП	12-бітний АЦП	10-бітний АЦП

ЦАП	2 канали 8-біт ЦАП	Відсутній
Швидкість передачі даних	До 5 Мбіт/с	До 115.2 Кбіт/с
Бездротові стандарти	Bluetooth 4.2, BLE, Wi-Fi 802.11 b/g/n	Відсутні

3.1.5 Опис схеми приймальної частини

Аналогові піни Arduino є 8-бітними АЦП, дискретизації яких виявилось недостатньо для отримання стабільного сигналу зі зразка. Вбудовані АЦП ESP32 мають більшу роздільну здатність, оскільки є 10-бітними, але також ускладнюють отримання точних результатів. Тому ми використовуємо дискретний модуль 16-бітного АЦП на базі **ADS1115**. Ця мікросхема містить у собі високоточне джерело опорної напруги, що має ультрамалий дрейф. Модуль також має вбудований підсилювач вхідного сигналу, що програмується для отримання необхідного підсилення [30]. Це вирішує проблему необхідності додаткового зовнішнього підсилення сигналу зі зразку. ADS1115 може опрацьовувати до 860 семплів за секунду, і цей показник встановлюватиме верхню межу частоти наших вимірів. Також він підтримує диференціальне двоканальне вимірювання.

Оскільки ми не використовуватимемо окремий мікроконтролер для приймаючої частини, немає необхідності окремо синхронізувати модуляцію засвічування зразка і отримання сигналу між елементами схеми, бо це відбуватиметься програмно на рівні реалізації асинхронного коду.

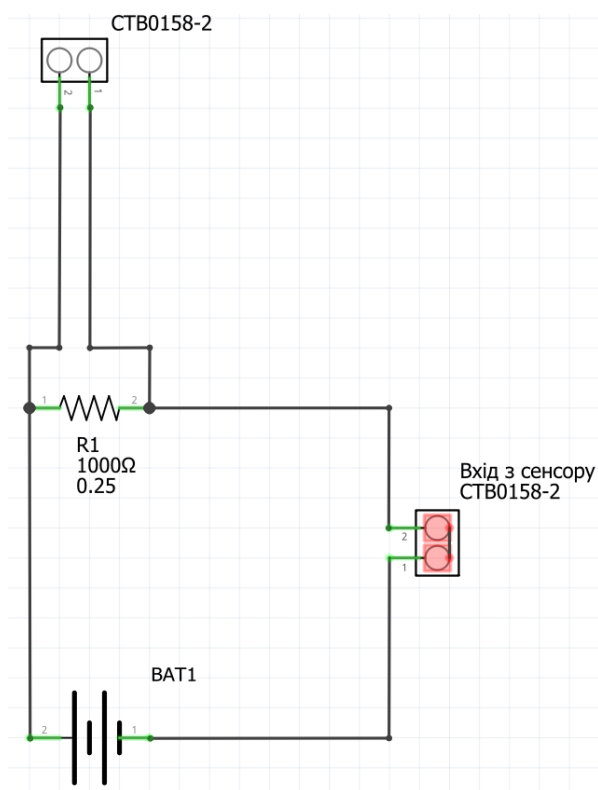


Рисунок 23. Електронна схема приймальної частини

В установці ми використовуватимемо зразок, виготовлений із кремнію р-типу. У приймальній частині буде розташоване джерело зовнішньої напруги 1.5В, що під'єднано до зразка. Під дією цієї зовнішньої прикладеної напруги, на одному контакті кремнієвої пластини виникає бар'єрний контакт. Величина зовнішньої напруги для створення у зразку індукованого р-п-переходу обирається експериментальним шляхом, оскільки нам не відомі його характеристики опору. Освітлення зразка ближче до бар'єрного контакту генеруватиме більший фотострум, через більшу концентрацію вільних носіїв.

Для отримання корисного сигналу, у схемі буде розміщено резистор опором 1кОм, з якого буде зніматися вихідний сигнал.

3.1.6 Додаткова підсвітка

Для тестування ефекту стаціонарного вигину зон біля поверхні, до системи може бути додана додаткова підсвітка із окремих світлодіодів з трикутними імпульсами модуляції. Для цього можна використати LED-

драйвер побудований на базі знижувального індуктивного драйвера Powtech PT4115 [23].

Його перевагою є підтримка як ШІМ, так і аналогового керування інтенсивністю, яке можна здійснювати подаючи на вхід DIM напругу в діапазоні 0.5 – 2.5В. При подачі напруги, меншої за 0.5В, драйвер вимикає світлодіод. Максимальна інтенсивність досягається за напруги від 2.5В, але не більшої за верхнє обмеження у 5В. Залежність вихідної сили струму від керуючої напруги робочого діапазону (у випадку аналогового керування драйвером) описується формулою:

$$I_{out} = \frac{0.1 \times V_{dim}}{2.5 \times R_s} \quad (0.5V \leq V_{dim} \leq 2.5V)$$

Для живлення ми можемо подавати на драйвер напругу в діапазоні 6 — 30В. Сила струму отримувана на виході з драйверу подається з точністю на рівні у 5%.

3.2 Проектування схеми у Fritzing

При проектуванні системи, враховуючи що пристрій є прототипом, було прийнято рішення робити його з модульною будовою. Такий підхід дозволяє модернізувати, допрацьовувати і легко замінювати окремі логічні модулі. Тому установку було поділено на такі складові:

- **Модуль матриці:** на цій платі розташовується сама світлодіодна матриця, два регістри зсуву для її керування, транзистори BC547 для керування інтенсивністю, обмежувальні резистори та вхідний конектор на 10 пінів для під'єднання цього модулю до решти системи

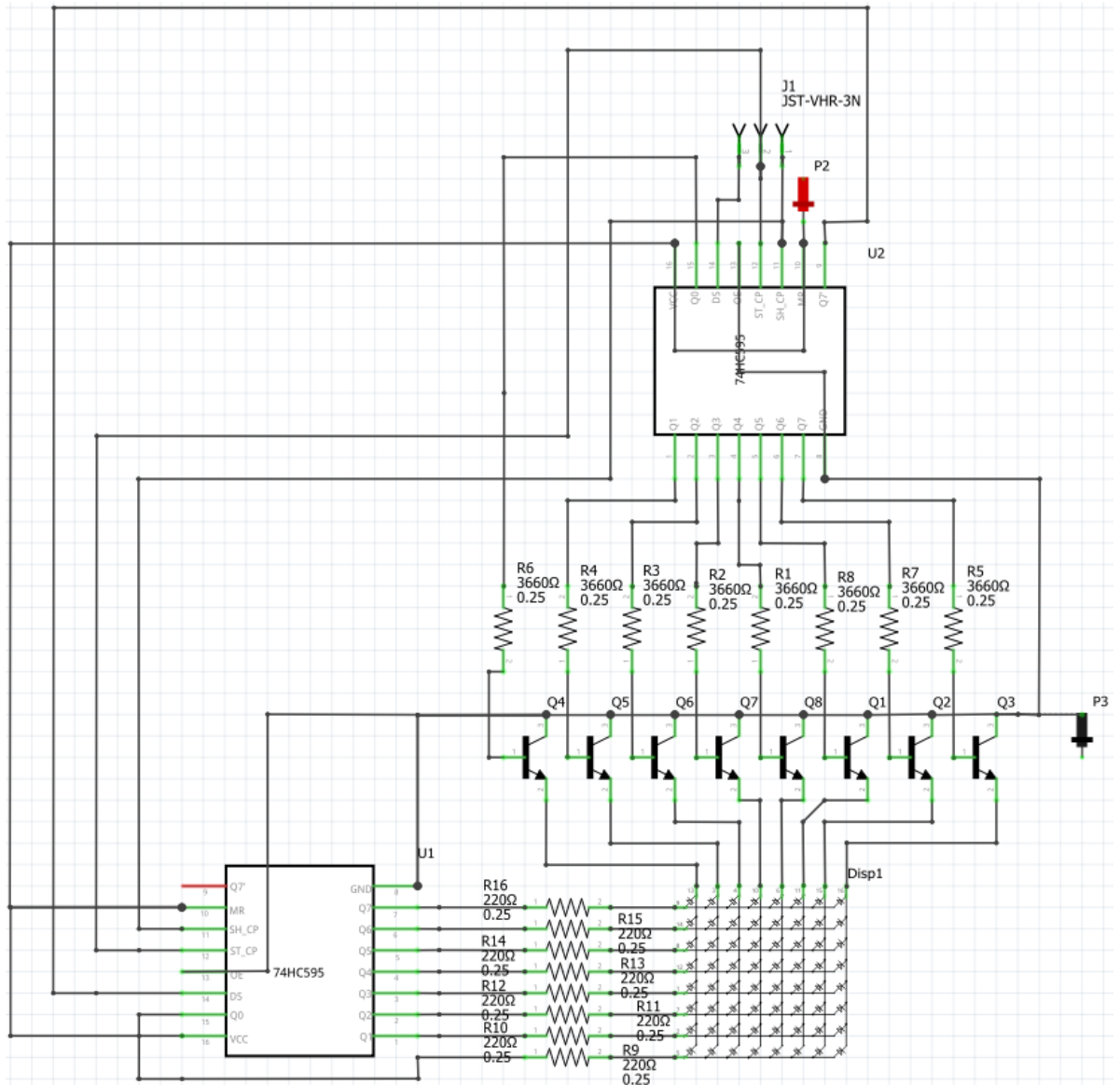


Рисунок 24. Електронна схема модулю матриці

- **Модуль контролера:** ця частина включає у себе мікроконтролер ESP32, ЦАП, схему керування інтенсивністю, виходи на освітлювальний модуль, приймальну частину і модуль живлення
- **Модуль приймальної частини:** на ньому розміщений АЦП, джерело живлення на 1.5В, резистор навантаження на 1000Ом з якого знімається напруга сигналу. Також розміщено інтерфейс підключення двох контактів зразка, та вихідний для передачі сигналу на контролер і керування АЦП по I_2C

- **Модуль керування:** на цій частині розміщені елементи керування пристроєм: енкодер керування частотою модуляції та інтенсивністю, перемикач режимів роботи, кнопка старту вимірювання і дисплей для відображення параметрів
- **Температурний датчик:** передбачений для дослідження температурної залежності вимірів і впливу зовнішніх умов на результат
- **Модуль додаткової підсвітки:** передбачено для подальшого тестування ефекту стаціонарного вигину зон біля поверхні

3.3 Програмний код мікроконтролера і алгоритм роботи

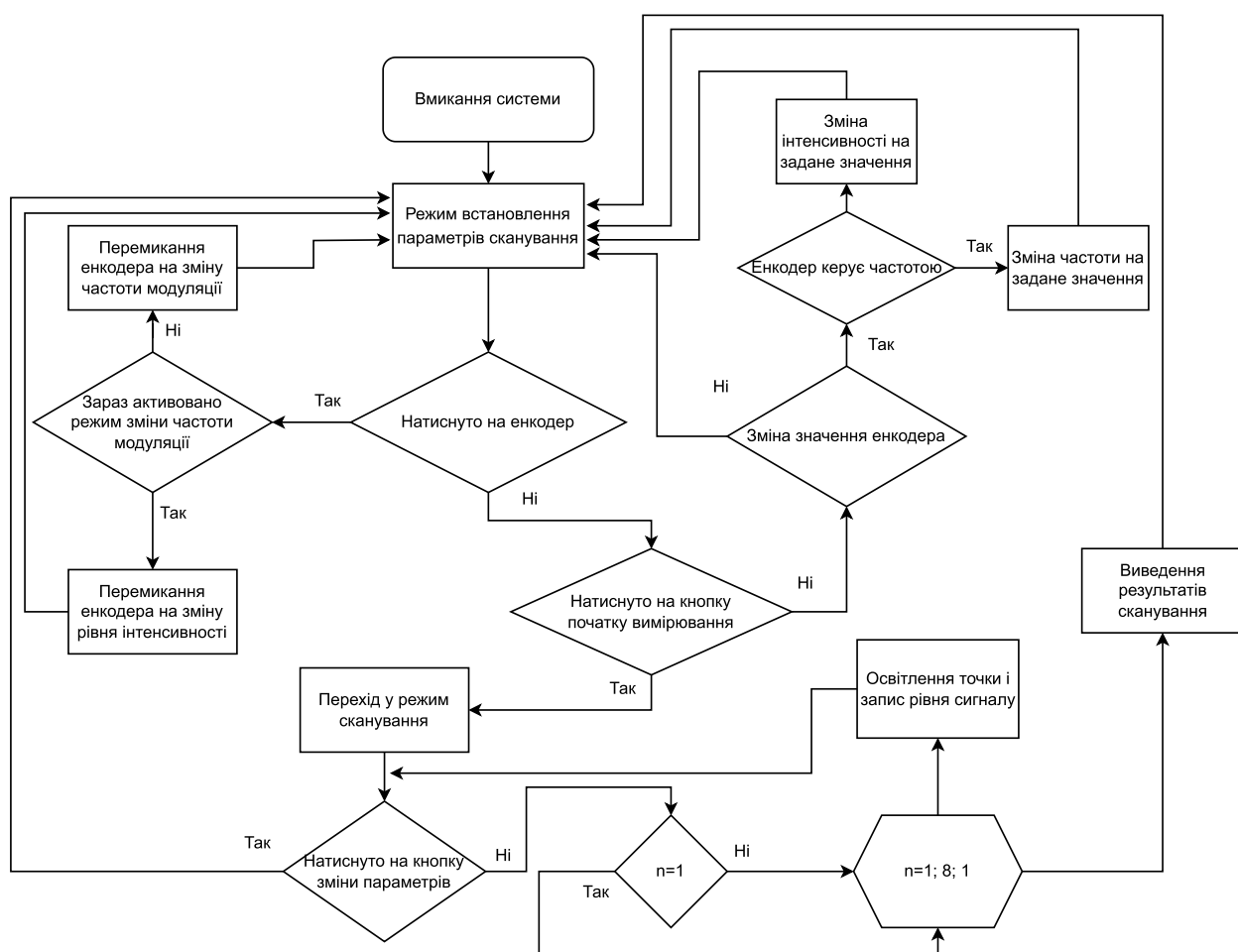


Рисунок 25. Алгоритм роботи програми пристрою

Програмний код контролера працює за принципом кількох if-циклів та millis() [24]. При вмиканні, контролер автоматично переходить у режим встановлення параметрів, в інших випадках він очікує на сигнал від однієї з

двох кнопок – першої, що вмикає режим встановлення параметрів (а також вона виконує функції переривання процесу вимірювання), і другої, що відповідає за початок вимірювання.

Коли система переходить у режим встановлення параметрів – контролер починає отримувати сигнал з енкодера для встановлення частоти модуляції. При натисканні на енкодер, контролер перемкнеться на задання рівня інтенсивності сканування. Відповідні значення при їхньому встановленні відображаються на екрані.

Далі ми натискаємо на кнопку початку вимірювання. Контролер переходить у режим сканування матрицею. Першим записується рядок метаданих виміру (дата, час, температура середовища). Далі світлодіоди послідовно вмикаються на певний інтервал на заданому раніше рівні інтенсивності і з встановленою частотою модуляції. Паралельно реєструється значення модульованого сигналу зі зразка і виводяться у вихідний файл результатів у форматі “dot [id] measurement: [result]”. Після завершення сканування виводиться рядок “measurement finished”.

В подальшому планується додати режим онлайн-сканування для зміни параметрів в реальному часі, щоб визначати експериментально оптимальні параметри сканування, які утворюють найкращий рівень сигналу, а також можливість змінювати алгоритми сканування.

3.4 Збирання схеми

У процесі роботи над прототипом, використовується монтаж на безпайкових макетних платах. Такий спосіб роботи дозволяє швидко

змінювати конфігурацію і компоненти схеми та пришвидшує процес розробки модулів. Також перевагою є легкість комутації елементів та блоків між собою.

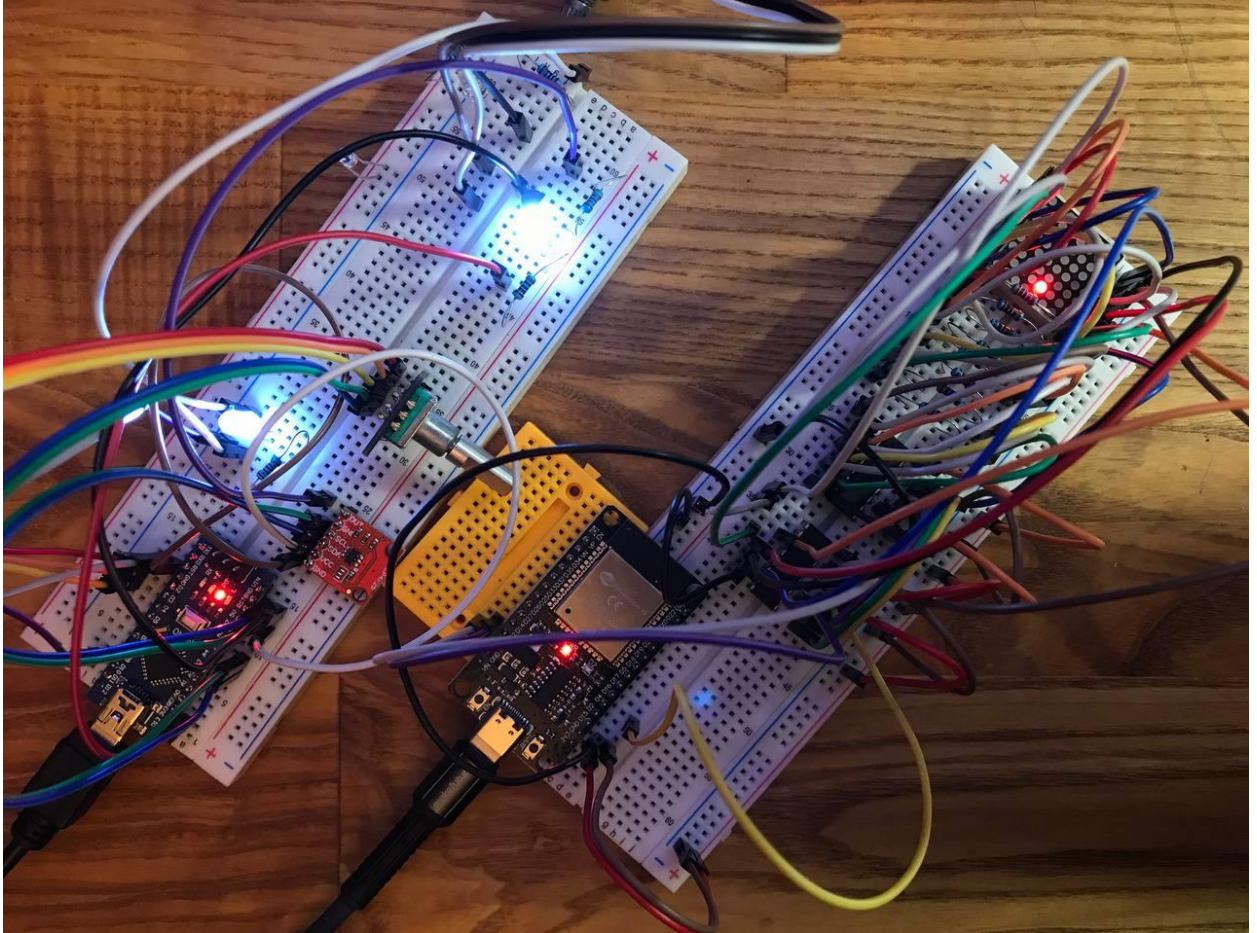


Рисунок 26. Прототипування системи керування матрицею на базі ESP32, n-p-n-транзистора BC547 та ЦАП MCP4725

Монтаж компонентів готових модулів може бути здійсненим на макетних платах під пайку. Такий спосіб реалізації забезпечує набагато надійніше з'єднання компонентів ніж безпайкова плата для макетування, і одночасно, на відміну від друкованих плат, дозволяє модифікувати прототип у процесі роботи. До мінусів такого рішення відноситься складність розведення модулю зі світлодіодною матрицею, оскільки конфігурація контактів елементів на ньому передбачає двошаровість плати. В подальшому планується виготовлення модулів на друкованих платах за технологією літографії, створення шаблонів для яких відбувається у програмі Fritzing.

При роботі з прототипом важливо дотримуватись обмежень температури і часу спаювання компонентів, зазначених у їхній документації. Так, для світлодіодної матриці передбачено не більше 3 секунд теплового контакту за температури 350 градусів.

3.5 Підготовка кремнієвого зразка

На нижній грані кремнієвої пластини ми зробили контакти за допомогою контактної пасти. Далі зразок фіксується на текстолітовій підкладці з двома контактами-виводами, що під'єднуються до приймальної частини схеми.

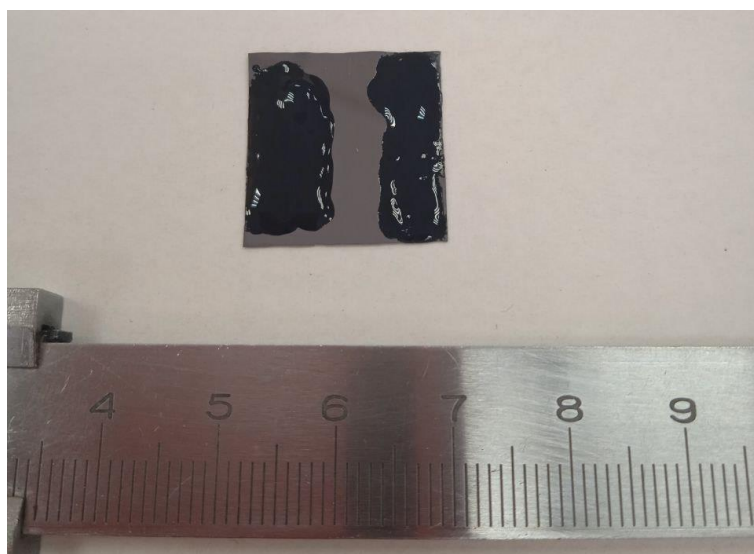


Рисунок 27. Контакти на кремнієвому зразку зроблені контактною пастою

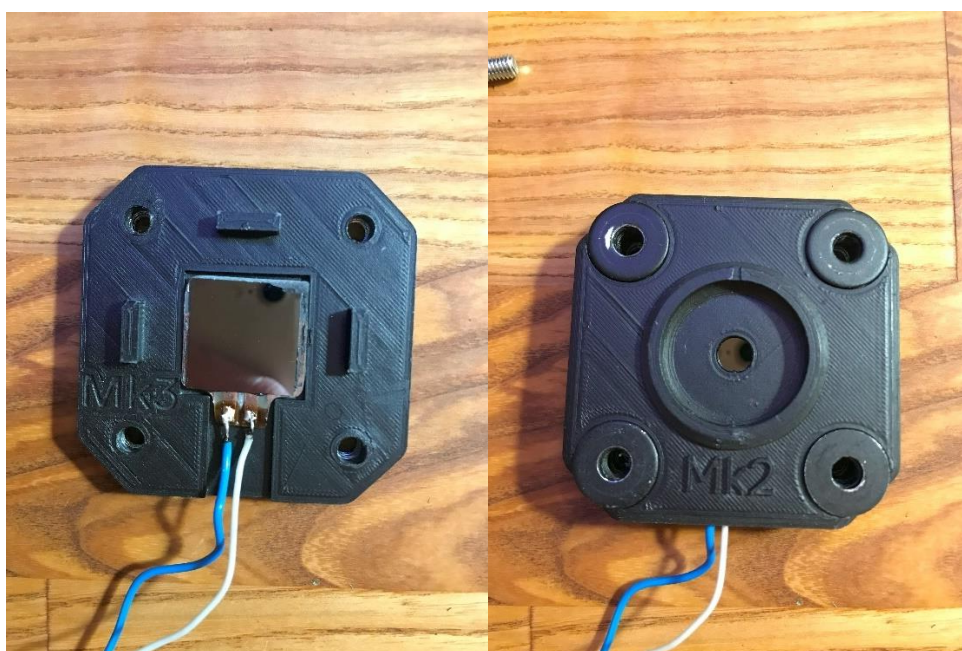


Рисунок 28. Кремнієвий зразок у кюветі для лазеру

РОЗДІЛ 4. ВИМІРЮВАННЯ І ОБРОБКА СИГНАЛІВ

4.1 Вимірювання

Для отримання результатів вимірювання через серійний порт і побудови графіку в режимі реального часу, використовуємо програму Processing Grapher [25].

Вона дозволяє будувати графік у довільних межах координат, змінювати частоту оновлення даних, тип графіка, експортувати виміри у форматі CSV та переглядати вже збережені файли.

Завдяки можливості спостерігати рівень сигналу в реальному часі, ми можемо змінювати параметри для його покращення і перезапускати виміри не чекаючи завершення повного циклу сканування.

Для тестування відгуку приймаючої сигнал частини прототипу, використаємо спочатку модульовану імпульсами різної довжини засвітку поверхні ліхтариком:

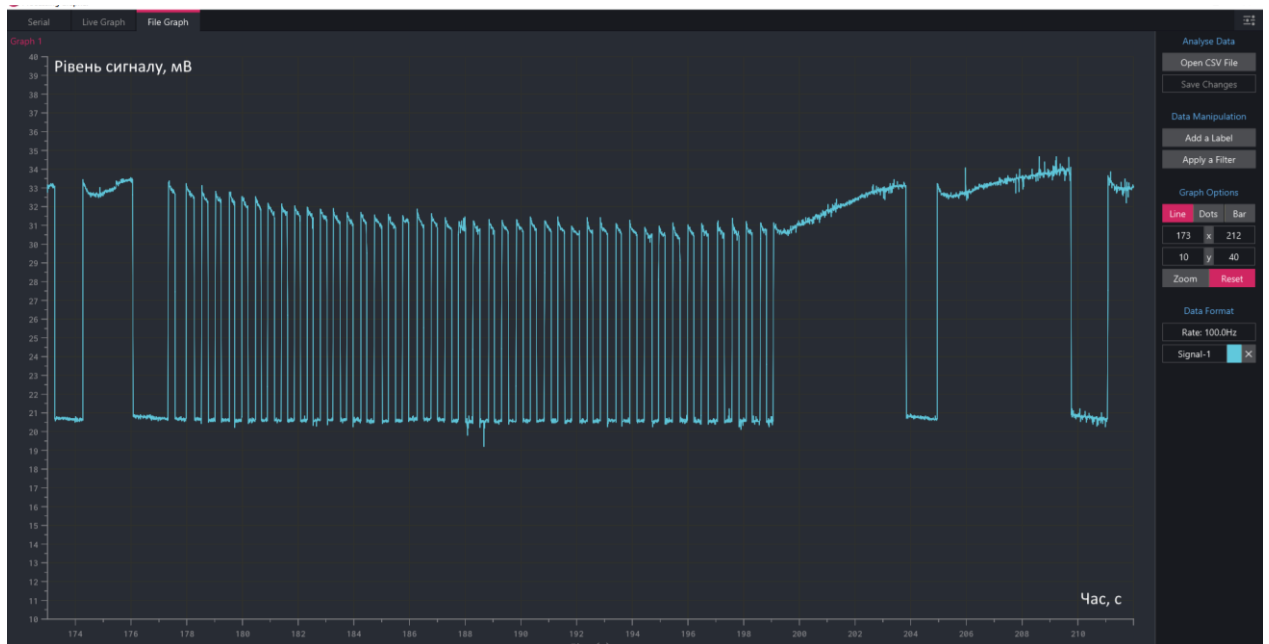


Рисунок 29. Відгук сенсору на ліхтарик з різною модуляцією імпульсів

Далі зробимо тестові виміри за допомогою світлодіодної матриці:

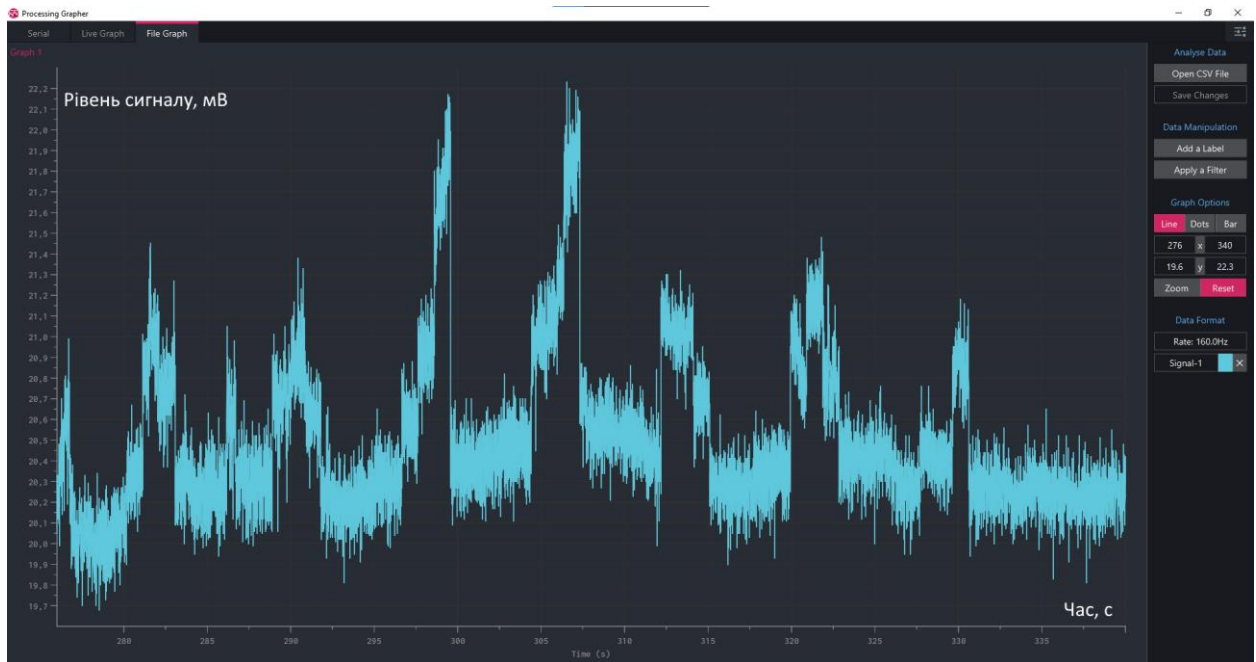


Рисунок 30. Графік сигналу зі зразка за повний цикл сканування матрицею

Параметри АЦП та підсилювача у Додатку 2. Період засвітки кожної точки становив 1 секунду, сканування відбувалось із нижнього рядка справа наліво. Протягом вимірювання виникали сильні зовнішні наведення і шуми у сигналі. Через це друкована схема потребуватиме детального планування розміщення компонентів при розведенні та ізоляції сигнальних з'єднань, оскільки рівень вхідного сигналу дуже малий і АЦП має дуже високу чутливість. Такий ефект може бути пов'язаний з особливостями джерела живлення схеми. Тестові виміри проведені без амплітудної модуляції сигналу, оскільки частота і амплітуда наявних шумів часто перешкоджають ідентифікації корисного модульованого сигналу.

4.2 Обробка результату

Розкид показників сигналу в одній точці вимірювання доволі високий, тому для кожної точки матриці ми шукаємо усереднене значення рівня сигналу. Таблиця з розрахованими рівнями сигналу в точках матриці наведена у Додатку 1.

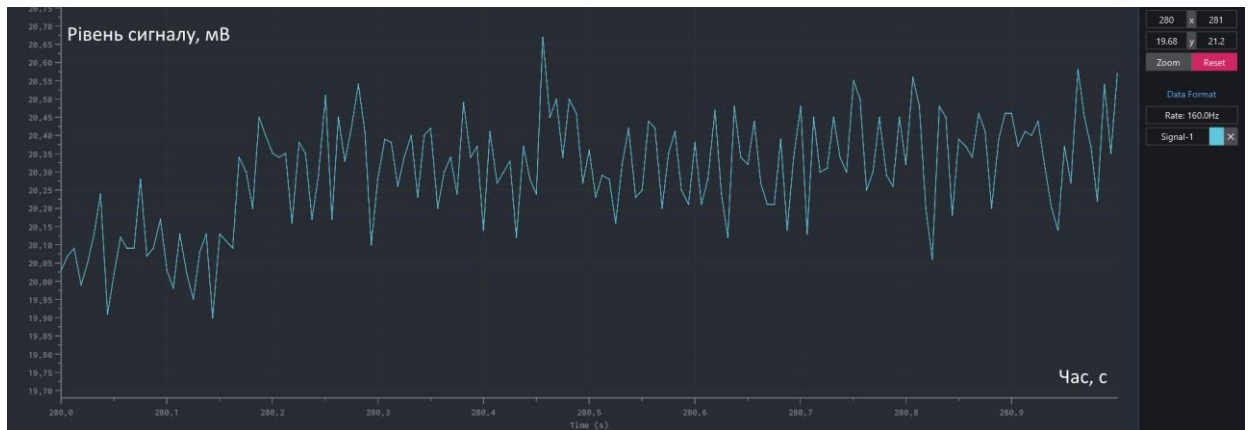


Рисунок 31. Виміри однією точкою матриці протягом 1 секунди

Отримані результату вимірювань побудуємо у вигляді 3D-графіку. По осям X та Y позначені рядки і стовпчики матриці (тобто нижня площина графіку утворює поверхню сенсору), по вертикальній осі розподілені значення сигналу в кожній із вимірюваних точок.

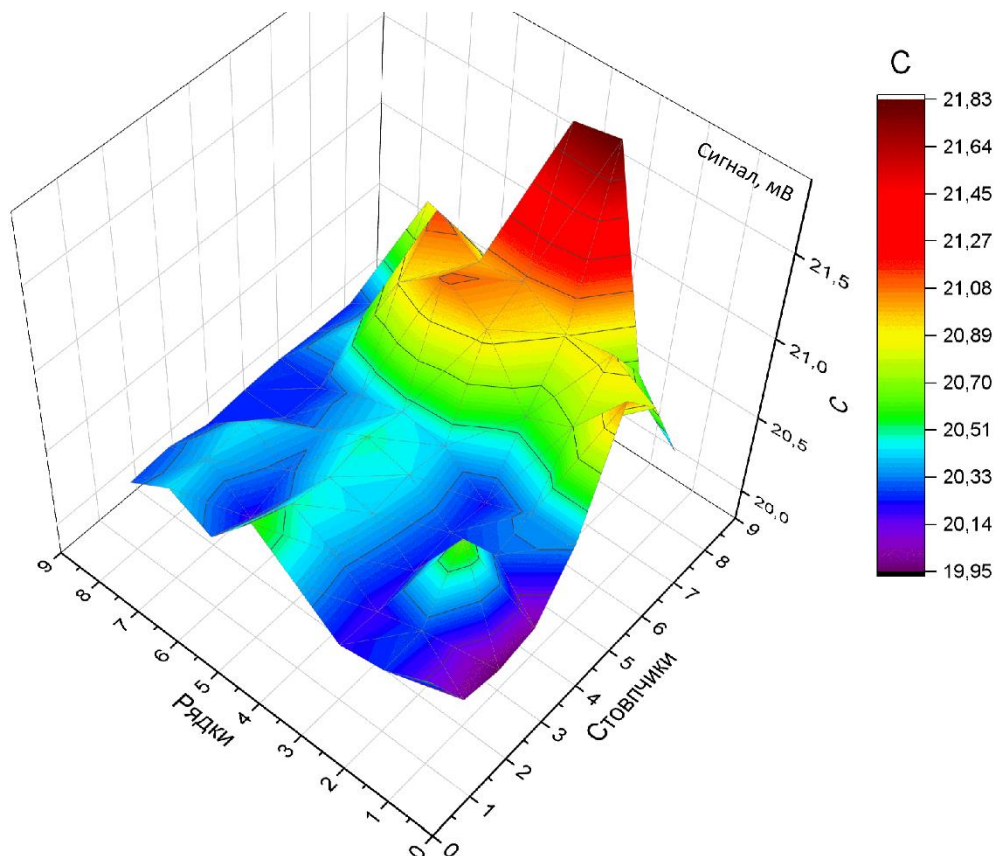


Рисунок 32. 3D-графік розподілу рівня сигналу по поверхні сенсора

ВИСНОВКИ

Досліджено принцип роботи фотоелектричних напівпровідникових сенсорів. Зокрема, ми розглянули види фотоелектричного ефекту, основні типи фотодетекторів та принципи їхньої роботи. Проаналізували застосування цього фізичного явища у системах LBIC, OBIC, «електронний ніс».

Розглянуто напівпровідниковий фотоелектричний сенсор на основі заглибленого кремнієвого переходу, в основі роботи якого - принцип впливу досліджуваного аналіту на швидкість поверхневої рекомбінації зразка. Зміни поверхневої рекомбінації впливають на фотострум та формують корисний сигнал, який можна використати для встановлення типу та властивостей аналіту.

Розроблено принципову схему системи портативного фотоелектричного рекомбінаційного сенсору. Вона складається з єдиного контролера ESP32, блоку компонентів для освітлення та блоку приймальної частини. Блок освітлення побудований на базі LED матриці, що керується за методом мультиплексування та за допомогою двох регістрів зсуву. Керування інтенсивністю реалізоване за методом керування струмом за допомогою ЦАП MCP4725 та п-р-п-транзистора. Модуляція засвітки здійснюється програмно, подачею контролером відповідного модульованого сигналу на ЦАП.

Приймальна частина складається з джерела живлення 1.5В для створення у зразку індукованого р-п-переходу, резистора навантаження та АЦП ADS1115, що забезпечує високу роздільну здатність та точність вимірювання.

Розроблено алгоритм роботи і програмний код для сканування зразка зі заданими частотою модуляції сигналу та рівнем інтенсивності.

Модульність системи дозволяє використовувати її для тестування і дослідження сенсорів різних типів. На основі цієї роботи створюється прототип портативного фотоелектричного сенсору.

Необхідно зменшити рівень шумів у сигналі з сенсору. Для цього можна врахувати розміщення компонентів на платі та можливі інтерференції між ними. Також необхідно забезпечити більш стабілізоване живлення системи [26].

Одним із можливих шляхів покращення точності роботи сенсору, що можна розглянути в подальших дослідженнях, є розробка нових алгоритмів обробки сигналу, зокрема використання програмного бенд-пас фільтру [27][28].

Для можливості легшої зміни алгоритму сканування, планується створити бібліотеку керування матрицею із регістрами зсуву, оскільки поточний варіант реалізації коду складний для модифікації послідовності сканування.

Також планується реалізувати модуль з використанням малопотужного напівпровідникового лазера і системи крокових двигунів для забезпечення більшого рівня інтенсивності світлового потоку при скануванні [29].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Kozinetz A. V., Litvinenko S. V., Skryshevsky V. A. Physical properties of silicon sensor structures with photoelectric transformation on the basis of “deep” p–n-junction. Ukrainian Journal of Physics. 2017. Vol. 62, no. 4. P. 318–325. URL: <https://doi.org/10.15407/ujpe62.04.0318> (date of access: 09.06.2023).
- [2] Rana F. Photodetectors and solar cells. Cornell University. URL: <https://courses.cit.cornell.edu/ece533/Lectures/handout5.pdf> (date of access: 01.06.2023).
- [3] Колонтаєвський Ю. П., Тугай Д. В., Котелевець С. В. Фотоенергетика навчальний посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекет., 2019. 162 с. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/55310/1/2019%2028Н%20печ%20ФЕ.%20Посібник%20О.pdf> (дата звернення: 11.06.2023).
- [4] Козярьський І. ФОТОЕЛЕКТРОНІКА ТА ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ Навчальний посібник. ЧЕРНІВЦІ : Чернів. нац. ун-т, 2019. 136 с. URL: https://archer.chnu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/136/Koziarskyi_I_P_Photoel_and_optoel.pdf (дата звернення: 11.06.2023).
- [5] Гетьманенко О. Оцінка фотоелектричних сонячних систем як джерел альтернативної енергії. Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Енергетика». 2020. С. 6–8. URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2020/02/getmanenko-o.o.-vseukrayinskyj-konkurs-energetyka-za-napryamom-alternatyvni-ta-vidnovlyuvalni-dzherela-energiyi.docx> (дата звернення: 11.06.2023).
- [6] Ye Z., Liu Y., Li Q. Recent progress in smart electronic nose technologies enabled with machine learning methods. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 22. P. 7620. URL: <https://doi.org/10.3390/s21227620> (date of access: 11.06.2023).
- [7] Mottram D., Elmore J. SENSORY EVALUATION | Aroma. 2003. URL: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/01068-3> (date of access: 03.06.2023).

- [8] Electronic noses and their applications for sensory and analytical measurements in the waste management plants—a review / J. Jońca et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 4. P. 1510. URL: <https://doi.org/10.3390/s22041510> (date of access: 19.06.2023).
- [9] Toward optical sensors: review and applications / N. Sabri et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 423. P. 012064. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/423/1/012064> (date of access: 19.06.2023).
- [10] An insight into optical beam induced current microscopy: Concepts and applications / G. Zhuo et al. *Microscopy Research and Technique*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1002/jemt.24212> (date of access: 17.06.2023)
- [11] Optical Beam Induced Current. Semitracks, Inc. URL: <https://www.semitracks.com/reference-material/failure-and-yield-analysis/failure-analysis-die-level/optical-beam-induced-current.php> (date of access: 04.06.2023).
- [12] T. Chaikivskyi, B. B. Sus', A. Hunkalo. Microcontroller-Based multi-channel sensor system for monitoring the quality of spirit beverages. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : Міжнародна конференція, Lviv-Slavske, 25–29 February 2020. Lviv-Slavske, 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235391> (date of access: 09.06.2023).
- [13] Козинець О. В. Порівняльна характеристика ефективності сенсорних структур на основі глибоких кремнієвих р-п переходів з активними областями, які мають різний тип електричної провідності / О. В. Козинець // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. - 2018. - Т. 15, № 1. - С. 30-37. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/seimt_2018_15_1_5 (date of access: 09.06.2023).
- [14] Kozinetz A., Tsymbalyuk O., Litvinenko S. Application of sensor structures based on a photoelectric transducer to determine the activity of aspartate and

- alanine aminotransferases in blood plasma. Biomedical Physics & Engineering Express. 2023. URL: <https://doi.org/10.1088/2057-1976/acd55b> (date of access: 09.06.2023).
- [15] Overview of photoelectric sensors. OMRON Industrial Automation. URL: <https://www.ia.omron.com/support/guide/43/introduction.html> (date of access: 09.06.2023).
- [16] A Study on the Performance of a Silicon Photodiode Sensor for a Particle Dosimeter and Spectrometer / B. Kim et al. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 23. P. 8029. URL: <https://doi.org/10.3390/s21238029> (date of access: 17.06.2023).
- [17] How to use the BC547 Transistor (NPN) (with examples) - DIY Engineers. DIY Engineers. URL: <https://www.diyengineers.com/2022/05/05/how-to-use-the-bc547-transistor-npn-with-examples/> (date of access: 09.06.2023).
- [18] DigiKey's North American Editors. Precisely control LED luminance using a current output DAC and TIA. DigiKey. URL: <https://www.digikey.com/en/articles/precisely-control-led-luminance-using-a-current-output-dac-and-tia> (date of access: 10.05.2023).
- [19] Introduction to driving LED matrices, application note 1216. Broadcom Inc. URL: https://docs.broadcom.com/doc/AV02-3697EN?ICID=I-CT-TECH-RES-CLA-SEP_21-0 (date of access: 09.06.2023).
- [20] Led matrix TOP-CA-788BS datasheet. Toplite. URL: <http://www.ledtoplite.com/uploadfile/2017/TOP-CA-788BS.pdf> (date of access: 09.06.2023).
- [21] MCP4725 datasheet. Microchip. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf> (date of access: 09.06.2023).
- [22] Adafruit. MCP4725 12-Bit DAC Tutorial. Adafruit Learning System. URL: <https://learn.adafruit.com/mcp4725-12-bit-dac-tutorial/using-with-arduino> (date of access: 09.06.2023).

- [23] PT4115 datasheet. РКС Компоненти - РАДІОМАГ. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/pt4115e_datasheet.pdf (date of access: 09.06.2023).
- [24] Earl B. Multi-tasking the arduino - part 1. Adafruit Learning System. URL: <https://learn.adafruit.com/multi-tasking-the-arduino-part-1/overview> (date of access: 02.06.2023).
- [25] Processing Grapher – chillibasket. chillibasket – A Robotics and Technology Blog. URL: <https://wired.chillibasket.com/processing-grapher/> (date of access: 26.05.2023).
- [26] B. B. Sus, S. P. Zagorodnyuk, O. S. Bauzha, N. O. Diachuk and A. V. Kozinetz. "Simulation of remote-controlled power supplies for laboratory and research work," 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Lviv, Ukraine, 2021, pp. 2/11-2/15, <https://doi.org/10.1109/CADSM52681.2021.9385227> (date of access: 04.06.2023).
- [27] Arduino Tutorial: Simple High-pass, Band-pass and Band-stop Filtering – Norwegian Creations. URL: <https://www.norwegiancreations.com/2016/03/arduino-tutorial-simple-high-pass-band-pass-and-band-stop-filtering/> (date of access: 04.06.2023).
- [28] Juergen Schwietering. Розрахунок параметрів бенд-пас фільтру для вхідного сигналу. URL: <http://www.schwietering.com/jayduino/filtuino> (дата звернення: 18.06.2023).
- [29] Hjern G. The modernization of a DOS-based time critical solar cell LBIC measurement system. 2019. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21301.01765> (date of access: 17.06.2023).
- [30] ADS1115 - A/D converter with amplifier • Wolles Elektronikliste. Wolles Elektronikliste. URL: <https://wolles-elektronikkiste.de/en/ads1115-a-d-converter-with-amplifier> (date of access: 22.05.2023).

ДОДАТОК 1

Номер стовпчика	Номер рядка	Значення сигналу	Секунда вимірювання
1	1	20,4	276
2	1	20	277
3	1	19,95	278
4	1	20	279
5	1	20,35	280
6	1	21,05	281
7	1	20,8	282
8	1	20,3	283
1	2	20,25	284
2	2	20,27	285
3	2	20,65	286
4	2	20,3	287
5	2	20,35	288
6	2	20,7	289
7	2	20,95	290
8	2	20,63	291
1	3	20,2	292
2	3	20,18	293
3	3	20,22	294
4	3	20,25	295
5	3	20,22	296
6	3	20,58	297
7	3	20,9	298
8	3	21,83	299
1	4	20,4	300

2	4	20,37	301
3	4	20,41	302
4	4	20,44	303
5	4	20,41	304
6	4	20,95	305
7	4	21,05	306
8	4	21,78	307
1	5	20,6	308
2	5	20,5	309
3	5	20,45	310
4	5	20,5	311
5	5	20,45	312
6	5	21,1	313
7	5	21	314
8	5	20,7	315
1	6	20,3	316
2	6	20,2	317
3	6	20,3	318
4	6	20,35	319
5	6	20,37	320
6	6	20,9	321
7	6	21,15	322
8	6	20,8	323
1	7	20,43	324
2	7	20,4	325
3	7	20,44	326
4	7	20,25	327
5	7	20,24	328

6	7	20,45	329
7	7	20,4	330
8	7	20,87	331
1	8	20,27	332
2	8	20,29	333
3	8	20,23	334
4	8	20,25	335
5	8	20,26	336
6	8	20,24	337
7	8	20,235	338
8	8	20,25	339

ДОДАТОК 2

```

#include<ADS1115_WE.h>
#include<Wire.h>
#define I2C_ADDRESS 0x48
ADS1115_WE adc = ADS1115_WE(I2C_ADDRESS);
void setup() {
    Wire.begin();
    Serial.begin(115200);
    if(!adc.init()){
        Serial.println("ADS1115 not connected!");
    }
    /* Set the voltage range of the ADC to adjust the gain
    adc.setVoltageRange_mV(ADS1115_RANGE_0256);
    adc.setCompareChannels(ADS1115_COMP_0_GND);
    adc.setConvRate(ADS1115_860_SPS);
    adc.setMeasureMode(ADS1115_CONTINUOUS);
}
void loop() {
    float voltage = 0.0;
    voltage = readChannel(ADS1115_COMP_0_GND);
    Serial.println(voltage);
}
float readChannel(ADS1115_MUX channel) {
    float voltage = 0.0;
    adc.setCompareChannels(channel);
    voltage = adc.getResult_mV();
    return voltage;
} [30]

```