

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

проф. Валерій Антонович Скришевський

Протокол №____ засідання кафедри

від “____” _____ 2026 р.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОВІДГУКУ ПЛІВОК МЕЛАНІНУ,
ОТРИМАНИХ З ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра
студента спеціальності 105

Прикладна фізика та наноматеріали
ОП «Нанофізика та комп’ютерні технології»

Остапенка Олександра Юрійовича

Науковий керівник
доцент кафедри нанофізики
конденсованих середовищ
д.ф.-м.н. **Саріков Андрій Вікторович**

Оцінка захисту роботи

Київ – 2026 р.

АНОТАЦІЯ

Остапенко О.Ю. Дослідження фотовідгуку плівок меланіну, отриманих з органічних матеріалів. – Випускна кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології».

У дипломній роботі проведено дослідження фотоелектричних властивостей плівок меланіну і розрахунок часу життя нерівноважних носіїв заряду, які виникають при освітленні. Для високоомних зразків меланіну розроблено електрометричну схему на основі польового транзистора з вхідним опором 10 ГОм, а також використано широкосмугове оптичне збудження з механічною модуляцією. Виявлено виражену асиметрію кінетичних кривих у циклах освітлення – темрява. Доведено, що механізм фотовідгуку в досліджуваних плівках носить стрибковий характер і контролюється процесами захоплення та термічного вивільнення фотогенерованих носіїв заряду на глибоких локалізованих станах (пастках), характерних для аморфної структури меланіну.

Отримані результати мають наукове значення для фундаментального розуміння електронних процесів в органічних напівпровідниках, а також відкривають перспективи використання плівок меланіну як екологічно безпечного, біосумісного матеріалу для створення елементів органічної оптоелектроніки, біосенсорики.

Ключові слова: меланін; еумеланін; органічний напівпровідник; фотопровідність; фотовідгук; час життя нерівноважних носіїв заряду.

ABSTRACT

Ostapenko O.O. Investigation of the photoresponse of melanin films obtained from organic materials. – Bachelor's qualification work in Specialty 105 "Applied Physics and Nanomaterials", Educational Program "Nanophysics and Computer Technologies".

In the thesis, the photoelectric properties of melanin films were studied and the lifetime of non-equilibrium charge carriers generated during illumination was calculated. For high-resistance melanin samples, an electrometric scheme based on a field effect transistor with an input resistance of 10 G Ω was developed, and broadband optical excitation with mechanical modulation was also used. A pronounced asymmetry of kinetic curves in light-dark cycles was revealed. It has been proven that the mechanism of photoresponse in the studied films is jump-like and is controlled by the processes of trapping and thermal release of photogenerated charge carriers in deep localized states (traps) characteristic of the amorphous structure of melanin.

The obtained results are of scientific importance for the fundamental understanding of electronic processes in organic semiconductors, and also open up prospects for the use of melanin films as an environmentally safe, biocompatible material for creating elements of organic optoelectronics and biosensors.

Keywords: melanin; eumelanin; organic semiconductor; photoconductivity; photoresponse; lifetime of non-equilibrium charge carriers.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	6
Вступ.....	7
Розділ 1 Огляд літератури.....	10
1.1. Структура	10
1.2. Фізичні властивості меланіну.....	11
1.2.1. Оптичні властивості.....	11
1.2.2. Електричні властивості.....	12
1.2.3. Перспективність меланіну як матеріалу для фотовольтаїки	13
1.3. Явище фотопровідності у напівпровідниках.....	14
1.4. Методики дослідження фотопровідності меланіну	16
1.5. Висновки до розділу 1	17
Розділ 2 Матеріали та методики експерименту.....	18
2.1. Об'єкти дослідження	18
2.1.1. Характеристики використаних фоторезисторів	18
2.1.2 Плівки меланіну	18
2.2. Експериментальні установки для дослідження фотовідгуку	20
2.2.1. Експериментальна установка для дослідження фотовідгуку фоторезисторів	21
2.2.2. Експериментальна установка для дослідження фотовідгуку плівок меланіну.....	23
2.3. Характеристики елементів схеми.....	26
2.3.1. Функціональний генератор імпульсів SDG1025	26
2.3.2. Осцилограф SDS1022dl	26
2.3.3. Джерело постійного струму Б5-47	27

2.3.4. Магазин опорів МСР-63	27
2.3.5. Магазин опорів РЗЗ.....	27
2.3.6. Цифровий мультиметр OWON XDM1041	27
2.3.7. Цифровий люксметр UNI-T UT381A.....	28
2.4. Програмне забезпечення.....	29
2.4.1. Origin	29
2.4.2. Python.....	29
2.5. Методичний підхід	29
2.5.1. Принцип вимірювання на установці для вимірювання фотовідгуку фоторезисторів	29
2.5.2. Принцип вимірювання на установці для вимірювання фотовідгуку плівок меланіну	30
2.5.3. Обробка даних.....	31
2.6. Висновки до розділу 2	34
Розділ 3. Експериментальні результати та їх обговорення.....	35
3.1. Експериментальне дослідження фотовідгуку фоторезисторів.....	35
3.1.1. Калібрування установки.....	35
3.1.2. Результати досліджень фоторезисторів СФ2-2 і СФ3-2Б.....	37
3.2. Розрахунок параметрів фотовідгуку меланіну з літературних даних .	39
3.3. Експериментальне дослідження фотовідгуку плівок меланіну.....	44
3.4. Висновки до розділу 3	47
Висновки.....	49
Список використаних джерел.....	51

Перелік умовних позначень

УФ – ультрафіолетовий

ІЧ – інфрачервоний

ФЕП – фотоелектричний перетворювач

DHI – 5,6-дигідроксиіндол

DHICA – 5,6-дигідроксиіндол-2-карбонова кислота

DOPA – 3,4-дигідроксифенілаланін

ІТО – оксид індію й олова

FF – фактор заповнення

ККД – коефіцієнт корисної дії

ВАХ – вольт-амперна характеристика

PET – поліетилентерефталат $[-(\text{OC})-\text{C}_6\text{H}_4-(\text{CO})\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{O}-]_n$

MDAS – Мотт-Дейвісовий аморфний напівпровідник

JFET – польовий транзистор з керуючим р-п переходом

ПЗ – програмне забезпечення

Вступ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток біоелектроніки, «зеленої» енергетики та медицини, де виникає потреба у пристроях, які здатні безпечно взаємодіяти з живими тканинами, сприяє розробці та впровадженню органічних та біосумісних структур в електроніку.

У цьому контексті особливу увагу привертає меланін – клас біополімерів, які можуть бути отримані з натуральних і синтетичних матеріалів і визначаються як пігменти різноманітної структури. Меланін можна знайти у людському тілі, включаючи очі, внутрішнє вухо, стовбур головного мозку, і найбільше – у шкірі. Через свою наявність у шкірі меланін виконує функцію захисту від УФ-випромінювання [1]. Це природний біополімер, який поєднує в собі унікальні властивості: широкі смуги оптичного поглинання, здатність до змішаної іонно-електронної провідності та абсолютну біосумісність з живими організмами. Однак його фізичні властивості, зокрема механізми фотопровідності та кінетика носіїв заряду, залишаються мало вивчені.

Розробка методики для дослідження фотопровідності плівок меланіну, розрахунок ключових параметрів цього матеріалу та порівняльний аналіз з характеристиками еталонних неорганічних напівпровідників є актуальним завданням, вирішення якого сприятиме створенню нової елементної бази екологічно чистої електроніки.

Мета. Розробити методику для дослідження фотовідгуку плівок меланіну (еумеланіну).

Завдання.

1. Провести аналіз літературних джерел щодо методик вимірювання фотопровідності.
2. Розробити схему та сконструювати експериментальну установку по вимірюванню фотовідгуку плівок еумеланіну.

3. Провести вимірювання фотовідгуку промислових фоторезисторів та плівок еумеланіну.
4. Розрахувати час життя фотогенерованих носіїв заряду у фоторезисторах на основі результатів вимірювань їх фотовідгуку.
5. Розрахувати час життя фотогенерованих носіїв заряду у зразках еумеланіну на основі літературних даних.
6. Розрахувати час життя фотогенерованих носіїв заряду у зразках меланіну на основі результатів вимірювання фотовідгуку.
7. Проаналізувати отримані результати та зіставити з технологією отримання зразків, використовуючи літературні джерела.

Об'єкти дослідження: фоторезистори; тонкі плівки еумеланіну.

Предмет дослідження: фотовідгук фоторезисторів і плівок еумеланіну.

Методи дослідження: експериментальні (вимірювання фотовідгуку), аналітичні (аналіз даних, порівняння).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні особливостей фотовідгуку провідності плівок меланіну при різних напругах зміщення та дослідженні кінетики релаксації нерівноважних носіїв заряду. Встановлено, що кінетику зменшення фотоструму в меланіні можна наближено описати в рамках моделі для аморфних органічних напівпровідників [2]. Показано, що зі збільшенням напруги зміщення зростає характерний час встановлення фотоструму, що може свідчити про суттєву роль локалізованих станів, пасток заряду та іонно-електронного механізму провідності у процесах переносу заряду в меланіні. Отримані результати розширюють уявлення про фізичні механізми провідності органічних біоелектронних матеріалів на основі меланіну.

Апробація результатів дослідження

Експериментальні та теоретичні дослідження, викладені в роботі, виконували в рамках спільного науково-дослідного проєкту науковців Київського національного університету імені Тараса Шевченка та Національної академії наук України 4Ф-2024 – «Багатошарові структури з

гетеропереходами з органічним полімерним напівпровідником та тисловими рефлекторами на основі кремнієвих фотонних кристалів для фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії».

Результати проведених досліджень були представлені на XII Міжнародній конференції з актуальних проблем фізики напівпровідників 2026 (м. Дрогобич, Україна) доповіддю “Photoresponse Kinetics in DHICA-Eumelanin Films” у співавторстві з М. Семененком.

Публікації. За матеріалами дипломної роботи підготовлено одну наукову статтю, розміщено її як препринт на порталі arXiv.org та подано до друку до міжнародного наукового журналу Solar Energy Materials and Solar Cells (статус: submitted), а також опубліковано тези доповіді.

1. M. Semenenko, T. Yu. Obukhova, S. O. Kravchenko, O. S. Pylypchuk, O. Yu. Ostapenko, T. O. Kuzmenko, M. V. Voitovych, S. Davidenko, Ye. S. Davidenko, S. S. Davidenko, A. Sarikov “DHICA ion-modified melanin based porous Si solar cell” arXiv. 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.03649> (Submitted to Solar Energy Materials and Solar Cells)
2. Ostapenko O.Yu., Semenenko M.O. “Photoresponse Kinetics in DHICA-Eumelanin Films” // “Topical Problems of Semiconductors Physics” / Edited by Ihor Stolyarchuk. – Drohobych : Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, 2026. – P. 72.

Розділ 1

Огляд літератури

1.1. Структура

Згідно з сучасними класифікаціями меланіни поділяють на три основні класи. Еумеланін – нерозчинний чорно-коричневий пігмент, який утворюється під час окиснювальної полімеризації з 5,6-дигідроксиіндолових проміжних продуктів. Жовто-червоно-коричневий пігмент феомеланін, який утворюється в результаті окиснення попередників цистеїнілдопи через бензотіазинові і бензотіазолові проміжні продукти. Темний пігмент нейромеланін, який утворюється в нейронах шляхом окиснення дофаміну та інших попередників ехоламіну [1].

Найбільш вивченим типом меланіну є еумеланін. Цей пігмент складається з агрегованих олігомерних і полімерних сполук на основі індольних мономерів 5,6-дигідроксиіндолу (DHI) і 5,6-дигідроксиіндол-2-карбонової кислоти (DHICA) та їхніх різних окисно-відновних форм (рис. 1.1). Мономери випадково зшиваються з утворенням плоских шарів, які складаються через ароматичні π - π -взаємодії і мають різну довжину та характер кон'югації (5, 6, 7) [3].

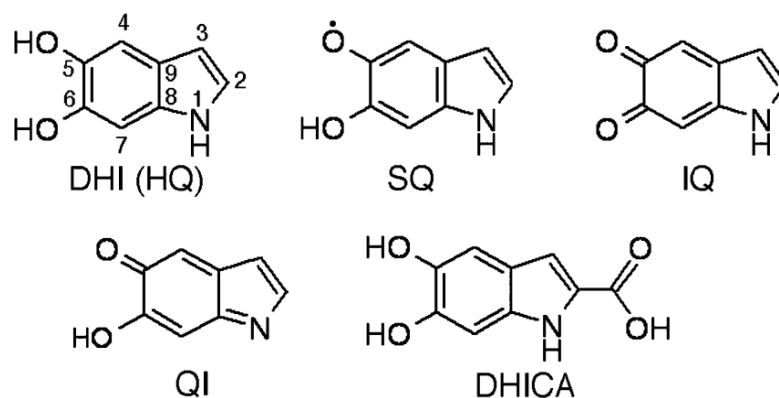


Рисунок 1.1 – Основні мономерні блоки еумеланіну (DHI та DHICA) та їхні окисно-відновні форми. HQ ілюструє стандартну нумерацію позицій зв'язків. SQ, IQ та QI є ймовірними окисно-відновними станами DHI [2]

Упродовж тривалого часу молекули меланіну розглядали як протяжні лінійні гомо- або гетерополімери з кон'югованою основою. Однак тепер широко прийнята неупорядкована двовимірна модель протомолекулярного шару (рис. 1.2) [3].

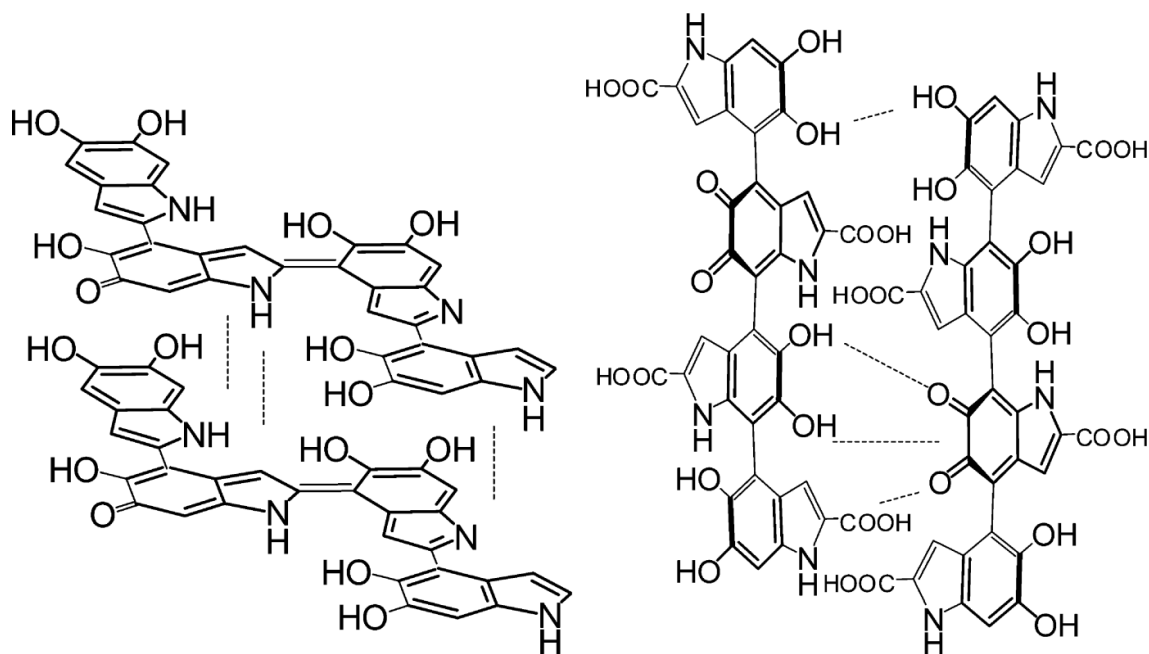


Рисунок 1.2 – Типові структури агломерованих тетрамерів меланінів на основі DHI (ліворуч) та DHICA (праворуч) [4]

Меланіни мають тенденцію утворювати олігомерні структури з 4–5 мономерних ланок, які потім об'єднуються один з одним за допомогою π – π взаємодій. Такі багат шарові олігомерні структури мають щільність 1,37 г/см³, розміри порядку 1–5 нм, а також є стійкими до зовнішніх впливів [1].

1.2. Фізичні властивості меланіну

1.2.1. Оптичні властивості

Спектр поглинання меланіну в УФ-видимому діапазоні має невиразний широкопasmовий експоненціальний профіль (рис. 1.3) без піку, що є нетиповим для органічного хромофора. Характерним явищем для меланіну є

зменшення поглинання зі збільшенням довжини хвилі від УФ-області до видимої області. Спостерігається лінійна залежність між логарифмом поглинання та довжиною хвилі в діапазоні від 400 до 600 нм з негативним нахилом, що є характерною ознакою для якісного виявлення меланіну в екстрактах. Спектр випромінювання меланіну демонструє квантовий вихід близько 0,1%, що вказує на розсіяння >99,9% поглинутої оптичної енергії у вигляді тепла. Цей механізм надшвидкої безвипромінювальної релаксації, зокрема для високоенергетичного УФ-випромінювання, зумовлює високу функцію фотозахисту меланіну [1, 5, 6].

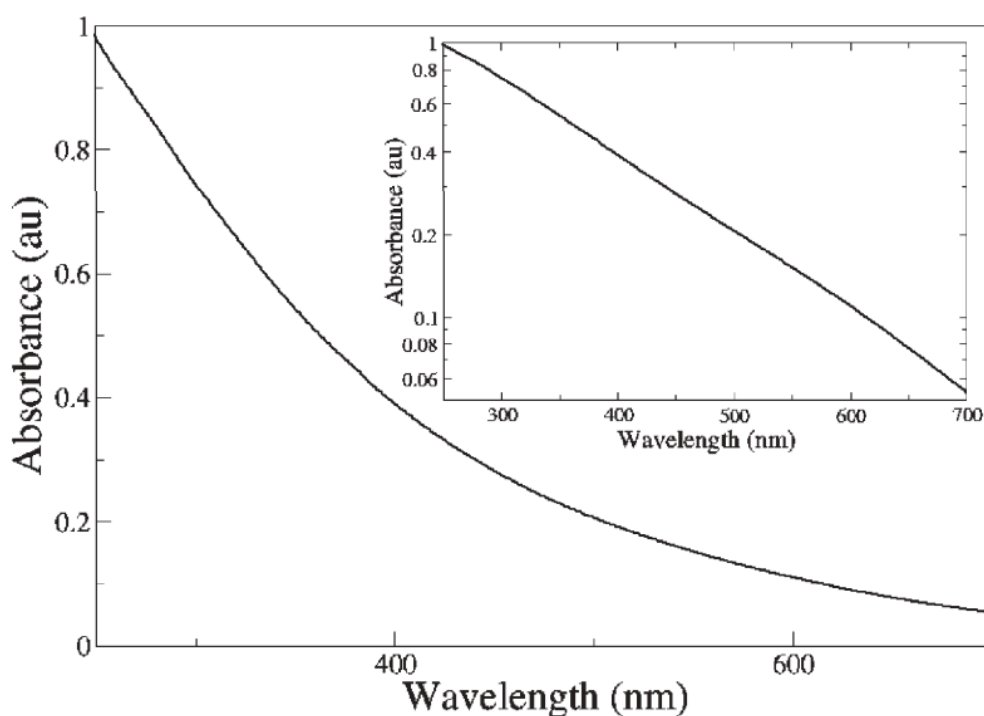


Рисунок 1.3 – Поглинання як функція довжини хвилі типового синтетичного водного розчину еумеланіну (0,0025 % за масою). На вставці ті самі дані показано на логарифмічно-лінійному графіку [7]

1.2.2. Електричні властивості

Меланін виявляє електричні властивості. Було виявлено явище перемикання провідного стану при прикладенні порогової напруги, що супроводжується переходом між станами «вимкнено» та «увімкнено», з

часом перемикання з тривалістю 1 мс. Була запропонована модель переносу заряду для опису механізму провідності меланіну [1, 7]. Транспорт носіїв заряду в меланіні має виражений стрибковий характер і суттєво ускладнений через його неупорядковану аморфну структуру. Відсутність дальнього порядку та наявність великої кількості структурних дефектів створюють високу концентрацію глибоких локалізованих станів (пасток) у забороненій зоні. Захоплення носіїв заряду цими глибокими пастками є домінуючим процесом. Оскільки заряди тимчасово утримуються в цих пастках і повільно з них вивільняються, їхня остаточна рекомбінація є значно відкладеною у часі. Це суттєво уповільнює загальну кінетику фотоструму та призводить до збільшення часу життя нерівноважних станів [7, 9, 10].

Було виявлено залежність провідності від вологості: при відносній вологості 0% провідність синтетичного DOPA-меланіну становила 10^{-13} См/см, а при відносній вологості 100% провідність підвищилась до 10^{-5} См/см, тобто провідність зросла до значення, типового, наприклад, для слабколегованого кремнію. Також зазначено, що провідність зразка меланіну збільшується з температурою. Це спостерігається у напівпровідниках, де термічна активація створює додаткові носії заряду [2].

1.2.3. Перспективність меланіну як матеріалу для фотовольтаїки

Поглинання світла в напівпровідниках збуджує електрони до вищих енергетичних рівнів. Ці електрони згодом можуть повертатися до основного стану з виділенням тепла (фототермічний ефект) чи світла (фотолюмінісценція) або залишаються у збуджених станах протягом свого життя та можуть бути вилучені, транспортовані та зібрані на електродах (фотоелектричний ефект) [11]. Завдяки широкосмуговому поглинанню в УФ, видимому і близькому ІЧ діапазонах, а також низькій вартості отримання плівок меланіну, застосування цього матеріалу у фотоелектричних пристроях привертає увагу дослідників. Використання меланіну у фотоелектричних

системах все ще перебуває на початковій стадії, наразі існує лише кілька повідомлень про використання цієї речовини в активному шарі сонячних елементів. Перший прототип ФЕП на плівках меланіну як окремий об'єкт дослідження був запропонований у роботі [12]. Органічно-неорганічний гетероперехід було сформовано шляхом крапельного нанесення водного розчину меланіну на поверхню пористого кремнію з наступним нагріванням до температури 60–70°C протягом 30–60 хв. ФЕП на основі структури алюміній–пористий кремній–меланін–ІТО–сітка зі срібла демонструють високий FF у 90% та ККД 0,03%. Хоча ВАХ гетеропереходу є типовою для діодів, фактори, які впливають на низький ККД ФЕП, потрібно з'ясовувати.

Природно, що гідрофільна природа меланіну та його провідність залежать від ступеня гідратації, тому можна припустити, що меланін можна використати як чутливий елемент при вимірюванні вологості. У роботі [13] було продемонстровано швидкий, стабільний і точний датчик вологості, виготовлений з самоорганізованих тонких плівок дофаміну та меланіну. Цей датчик був виготовлений на підкладці з PET.

1.3. Явище фотопровідності у напівпровідниках

Фотопровідність традиційно відігравала значну роль у дослідженнях напівпровідникових пристроїв і особливо у вивченні ковалентно зв'язаних напівпровідників та діелектриків. Оскільки це – додаткова провідність, яка виникає внаслідок поглинання (оптичних) фотонів, фотопровідність можна найчіткіше визначити в ситуаціях, коли власна темнова провідність матеріалу є низькою. Провідність у темряві, яка приводить до виникнення темнового струму, зумовлена тепловою рівноважною густиною вільних носіїв у матеріалі та повинна бути віднята від будь-якого виміряного струму, щоб отримати фактичний фотострум. Основними процесами, які визначають величину фотоструму, є генерація вільних електронів і дірок шляхом поглинання падаючих фотонів, транспортування цих вільних носіїв через

матеріал під впливом електричного поля та рекомбінація фотогенерованих електронів і дірок. Однак, враховуючи той факт, що у формуванні фотоструму беруть участь три окремі процеси, з цього випливає, що для коректної інтерпретації експериментальних результатів необхідний комплексний підхід з використанням різних методів фотопровідності, а також доповнення суміжними експериментами, такими як фотолюмінісценція чи імпедансна спектроскопія.

Генерація носіїв заряду під дією світла приводить до зміни електропровідності σ напівпровідника, вираз для якої за наявності нерівноважних електронів з концентрацією Δn та дірок з концентрацією Δp записують у вигляді

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{\phi} = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p], \quad (1.1)$$

де σ_0 – темнова провідність, σ_{ϕ} – фотопровідність, n_0 і p_0 – концентрації рівноважних електронів і дірок, μ_n і μ_p – рухливості електронів і дірок, e – елементарний заряд.

Після початку освітлення збільшується концентрація нерівноважних носіїв заряду, що приводить до посилення рекомбінації. Оскільки швидкість генерації нерівноважних носіїв заряду залишається постійною при постійній інтенсивності освітлення, то інтенсивність рекомбінації швидко досягає інтенсивності генерації носіїв, і встановлюється стаціонарний стан з нерівноважною концентрацією фотоносіїв.

Зміну концентрації нерівноважних носіїв за одиницю часу визначають як різницю між швидкостями генерації (G) і рекомбінації (R) носіїв:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = G - R = G - \frac{\Delta n}{\tau}. \quad (1.2)$$

Розв'язок рівняння (1.2) можна знайти, враховуючи, що $\Delta p = \Delta n \ll p_0$ і $p_0 \gg n_0$, а також що в момент часу $t = 0$ вмикається світло постійної інтенсивності. Тоді з урахуванням початкової умови $\Delta n = 0$ при $t = 0$ отримаємо

$$\Delta n = \Delta n_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (1.3)$$

де Δn_0 – значення нерівноважної концентрації електронів, яка встановилася, за умови $t \rightarrow \infty$.

Якщо в зразку створена стаціонарна концентрація нерівноважних носіїв заряду Δn_0 , і в момент $t = 0$ вимикається світло, то концентрація нерівноважних носіїв заряду буде спадати згідно з законом

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.4)$$

Отже, процеси зростання і спадання нерівноважної концентрації носіїв заряду відбувається за експоненціальним законом з постійною часу τ , яка відповідає часу життя нерівноважних носіїв заряду (рис. 1.4) [14–16].

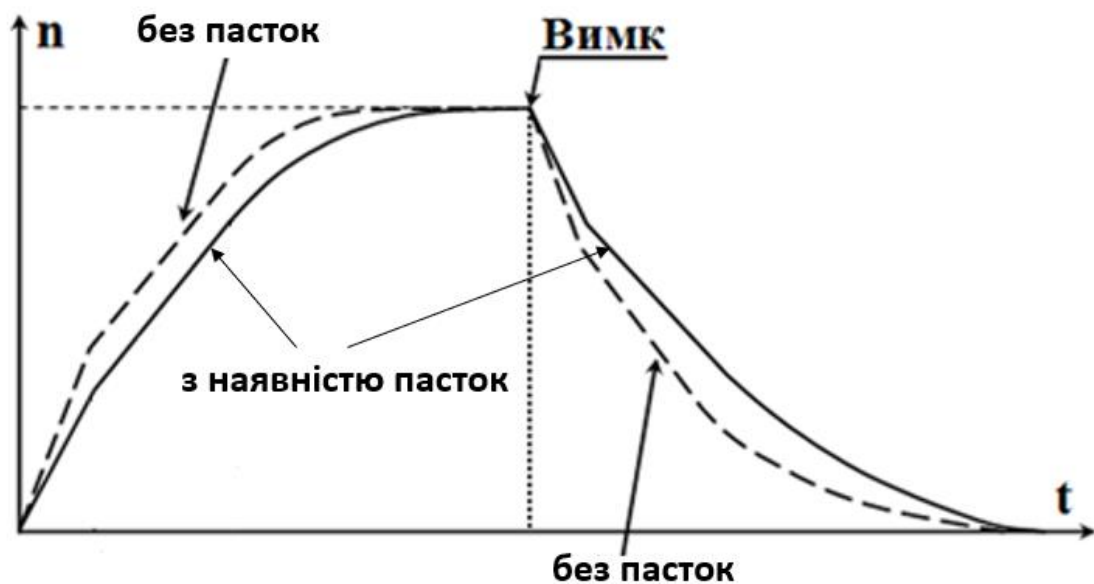


Рисунок 1.4 – Загальний вигляд кривої залежності концентрації носіїв заряду від часу при ввімкненні і вимкненні світла. Штрихова лінія – ідеальний напівпровідник без пасток; суцільна лінія – напівпровідник із локалізованими станами (пастками) [14]

1.4. Методики дослідження фотопровідності меланіну

Методи, які засновані на дослідженні фотопровідності, можна розділити на дві основні групи: одна пов'язана зі стаціонарною

фотопровідністю, де основну увагу приділяють стаціонарним рівням фотоструму, а друга пов'язана з перехідними ефектами, де вивчають еволюцію фотоструму з часом [17]. Модель провідності меланіну залишається до кінця не визначеною. Залежно від типу зразка (таблетки, плівки, осади), умов гідратації та методики вимірювань інтерпретації змінювались від аморфного напівпровідника до іонно-електронного провідника. Як показують різні роботи [3, 7, 18], механізм провідності значною мірою залежить від структури зразка та вмісту води, яка впливає на рухливість носіїв і домінуючий тип транспорту заряду. Тому моделі MDAS, порогового перемикачання або іонної провідності слід розглядати як взаємодоповнюючі, оскільки кожна з них актуальна для певних умов.

1.5. Висновки до розділу 1

У результаті аналізу літературних джерел щодо будови, оптичних та електричних властивостей меланіну можна зробити такі висновки.

1. Меланін є унікальним біополімером з розвиненою системою спряжених π -зв'язків, що визначає його властивості як аморфного органічного напівпровідника з гібридним (електронно-іонним) механізмом провідності, і може бути застосований у пристроях з перетворенням світлової енергії на електричну.
2. Огляд методик дослідження показав, що не існує загальноприйнятої теорії для опису кінетики фотопровідності меланіну, оскільки його властивості сильно залежать від структури зразка.
3. Виявлено нестачу прямих порівняльних досліджень органічного меланіну з класичними неорганічними фоторезисторами, що обґрунтовує доцільність проведення власного експериментально-розрахункового аналізу у наступних розділах роботи.

Розділ 2

Матеріали та методики експерименту

2.1. Об'єкти дослідження

2.1.1. Характеристики використаних фоторезисторів

У табл. 2.1 наведено основні фізичні та електричні параметри фоторезисторів, які використовували при вимірюваннях часу життя неосновних носіїв заряду.

Таблиця 2.1 – Фізичні та електричні параметри фоторезисторів (Примітка: складено за [19, 20] та технічною документацією виробника)

Тип фоторезистора	Матеріал	Розмір фоточутливого елемента, мм	Спектральний діапазон $\Delta\lambda$, мкм	$\lambda_{\text{макс}}$, мкм	Робоча напруга U_p , В (максимально допустима)	Темновий опір R_T , МОм
СФ2-2	CdS	6x12	0.3...0.85	0.6...0.7	2 (10)	4
СФ3-2Б	CdSe	5.8 (у діаметрі)	0.55...0.85	0.67...0.77	10 (50)	100

2.1.2 Плівки меланіну

Було використано два типи підкладок. Перший тип підкладки, схематично показаний на рис. 2.1, було обрано для вимірювання електричних характеристик плівок меланіну. Контактна сітка з протилежними штифтами з Ti-Ni з $N = 132$ штифти була виготовлена на керамічній (Sitall- Al_2O_3) пластині методом магнетронного осадження та фотолітографії. Оскільки меланін має високий опір, використання структури з протилежними

штифтами дозволяє збільшити значення струму під час електричних вимірювань. Ширина контактів становила 50 мкм, їхня висота – 3 мкм, відстань між контактами – 50 мкм, розміри сітки – $6,6 \times 5,2$ мм², довжина шляху між контактами від верху до низу конструкції – 34,3 см, а площа контакту плівок меланіну дорівнювала 0,01 см². Другий тип підкладок, а саме стандартні підкладки зі скла для мікроскопів, використовували для оптичних вимірювань.

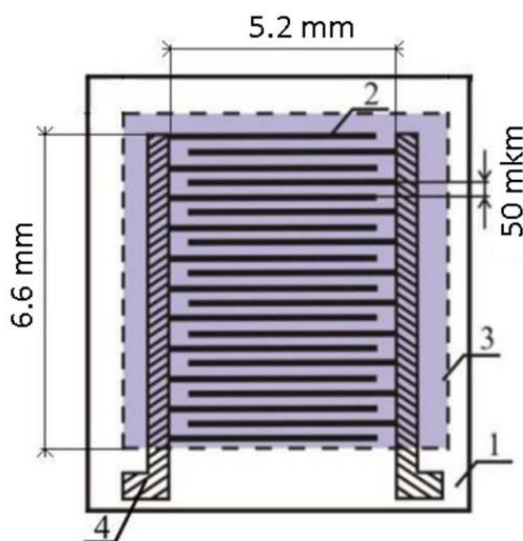


Рисунок 2.1 – Підкладка з контактною сіткою з титану-нікелю з протиштифтами: 1 – пластина Sitall, 2 – штифти, 3 – область меланіну, 4 – металева контактна сітка [21]

Для підготовки контактних підкладок використовували суміш, яку застосовували під час пайки нікелевих контактів. Вона складалась з 1% розчину HCl та 99% гліцерину. Після цього зразки обробляли в ультразвуковій ванні протягом 5 хвилин для очищення поверхні від залишкових забруднень та покращення адгезії плівки. Плівки меланіну формували шляхом нанесення розчину DHICA у вигляді аніонної форми (DHICA^-) на підкладку з контактною структурою. На поверхню наносили 10 мкл розчину. Після нанесення зразки висушували на повітрі за кімнатної температури протягом кількох діб до утворення суцільної плівки.

Ми використовували комерційно доступний розчин меланіну з концентрацією 10 мг/мл (1%) у воді, отриманий за методом, описаним у роботі [21]. Цей розчин було додатково розведено дистильованою водою до концентрацій 1 мг/мл (0,1%), 5 мг/мл (0,5%) та 8 мг/мл (0,8%) для отримання робочих розчинів для виготовлення плівок на підкладках. Такі концентрації розчину меланіну для вирощування плівок були обрані для відстеження залежності товщини та морфології плівки від концентрації, а також для визначення концентрації, яка забезпечує утворення суцільної плівки для подальших досліджень.

2.2. Експериментальні установки для дослідження фотовідгуку

Для проведення комплексних досліджень фотоелектричних властивостей різних типів структур в експериментальній установці було передбачено два незалежні методи оптичного збудження та модуляції світлового потоку. Вибір конкретної конфігурації визначався електричним опором досліджуваних зразків та ефективністю генерації в них нерівноважних носіїв заряду.

Систему на базі RGB-світлодіоду та генератора сигналів використовували для низькоомних зразків – фоторезисторів. Вона дозволяє здійснювати пряму високочастотну електронну модуляцію, що необхідно для аналізу швидких рекомбінаційних процесів.

Освітлювальну установку з білим світлом та механічним модулятором застосовували для високоомних зразків – плівок меланіну. Через стрибковий механізм транспорту заряду та вкрай малу кількість вільних носіїв для отримання фотовідгуку потрібне потужне широкосмугове джерело світла. Оскільки кінетика зміни концентрації носіїв заряду в меланіні є повільною, для формування чітких фронтів освітлення доцільно використовувати електромеханічний модулятор.

2.2.1. Експериментальна установка для дослідження фотовідгуку фоторезисторів

Принципова схема вимірювальної установки для дослідження фотовідгуку фоторезисторів представлена на рис. 2.2.

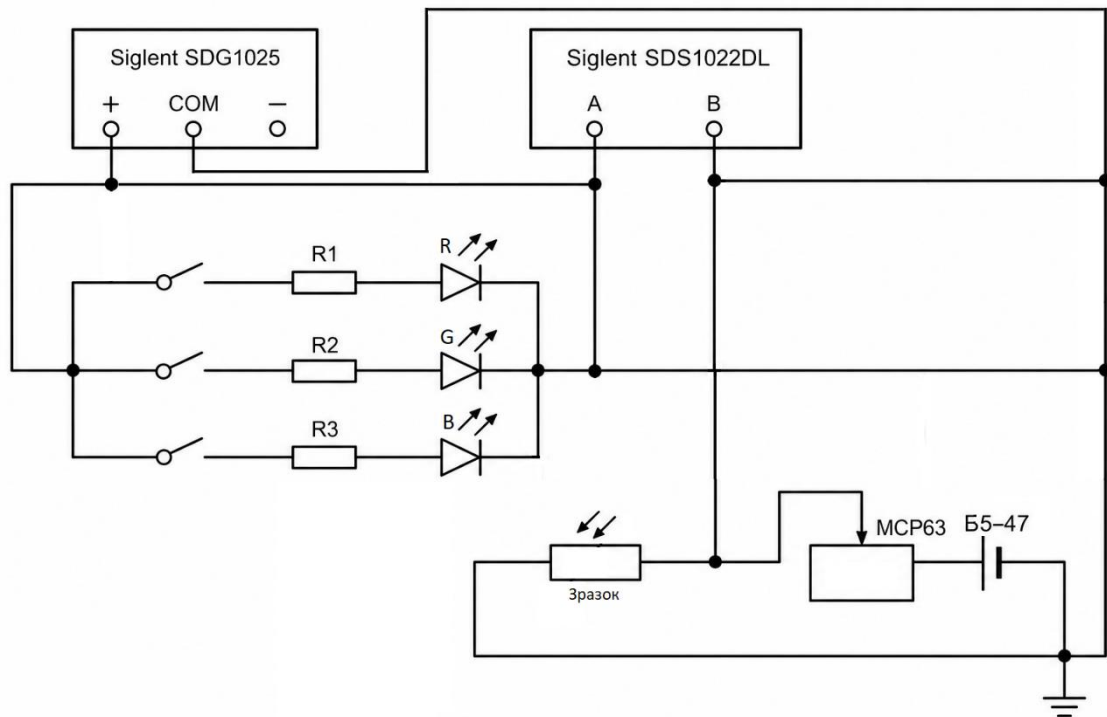


Рисунок 2.2 – Принципова схема установки для вимірювання фотовідгуку фоторезисторів

Функціональний генератор Siglent SDG1025 формує змінний електричний сигнал у вигляді прямокутного імпульсу заданої частоти та амплітуди. Цей сигнал подається на RGB-світлодіод. Інтенсивність світла на ньому вимірюється цифровим люксометром UNI-T UT381A. Канал А осцилографа Siglent SDS1022dl підключений паралельно до RGB-світлодіоду. Світло від світлодіоду падає на зразок. Коли на зразок потрапляє світло, у ньому генеруються нерівноважні носії заряду. Електричний опір зразка різко падає. Коли світло вимикається, носії заряду рекомбінують. Опір зразка повертається до початкового (темнового) рівня. Джерело зміщення Б5-

47 видає напругу, яку обирають для забезпечення роботи фоторезистора на лінійній (омічній) ділянці ВАХ та запобігання його тепловому перегріванню. Струм тече від джерела зміщення через резистор навантаження (магазину опорів) МСР-63, потім через зразок і на загальну землю. Магазин опорів МСР-63 і зразок утворюють дільник напруги. Напруга зміщення ділиться між ними пропорційно їхньому опору. На каналі В фіксуємо фронти сигналу, які будуть не вертикальними, на відміну від збудження, а експоненціальними. Ця експоненціальність дає змогу визначити інерційність фотовідгуку, тобто час генерації та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду.

Для проведення вимірювань фотовідгуку зразків було сконструйовано оптичний модуль, зображений на рис. 2.3. Запропонована схема працює на принципі вимірювання відбитого світла. Усі ключові електронні елементи системи змонтовані на загальній друкованій платі (РСВ). Знизу конструкція закрита базовою пластиною, у якій зроблено отвір для проходження світлових променів. Ця пластина виконує функцію механічного обмежувача для забезпечення стабільної фокусної відстані між оптикою та досліджуванним зразком і слугує екраном, який блокує потрапляння зовнішнього світла в зону вимірювання.

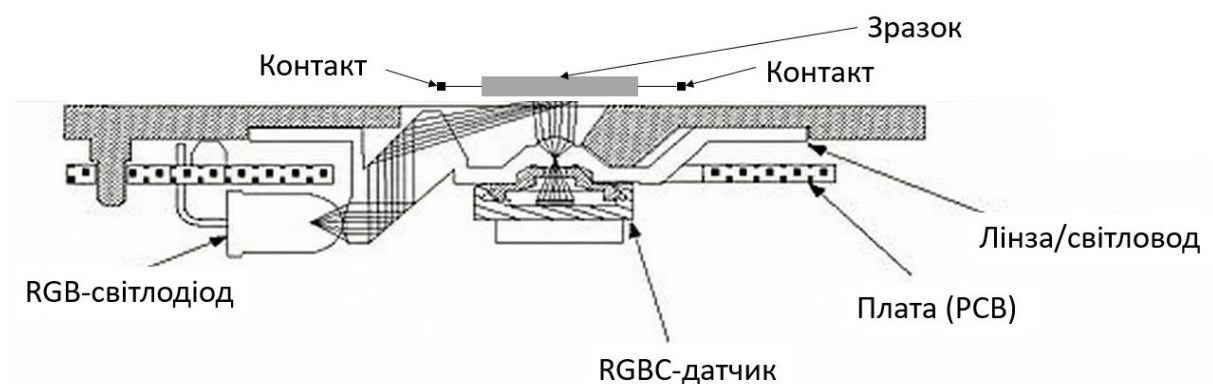


Рисунок 2.3 – Оптична система для дослідження фотовідгуку зразків

Джерелом освітлення виступає RGB-світлодіод, який генерує світловий потік, необхідний для аналізу поверхні. Світловод являє собою систему лінз.

Ця деталь, виготовлена з оптичного прозорого матеріалу, відповідає за перенесення випромінювання до зразка та збір відбитого сигналу.

Оптичний шлях у цій компактній системі є строго послідовним. Світло від RGB-світлодіоду потрапляє на тіло світловоду горизонтально. У правій частині світловоду знаходиться скошена поверхня, яка завдяки явищу повного внутрішнього відбиття працює як дзеркало, різко змінюючи напрямок променів вниз. Далі світло проходить крізь отвір у базовій пластині і падає на зразок під кутом, що відповідає ковзному падінню. Після взаємодії з матеріалом зразка світло розсіюється (відбувається дифузне відбиття). Безпосередньо над отвором у центрі оптичної деталі сформована збиральна лінза. Розсіяне світло, яке повернулося від поверхні, фокусується на приймальній площині датчика кольору (RGBC-датчик). Ця мікросхема аналізує отримане випромінювання, фіксуючи інтенсивність у червоному, зеленому та синьому спектральному діапазонах.

2.2.2. Експериментальна установка для дослідження фотовідгуку плівок меланіну

Оскільки меланінові плівки є високоомними, і вхідний опір вимірювальних пристроїв працює як навантаження, що блокує можливість спостерігати корисний сигнал, потрібно використовувати буферний підсилювач з великим вхідним опором. Для цієї цілі підходить польовий транзистор з негативним каналом, включений як повторювач або як підсилювач. Схема вимірювальної установки для дослідження фотовідгуку плівок меланіну представлена на рис. 2.4.

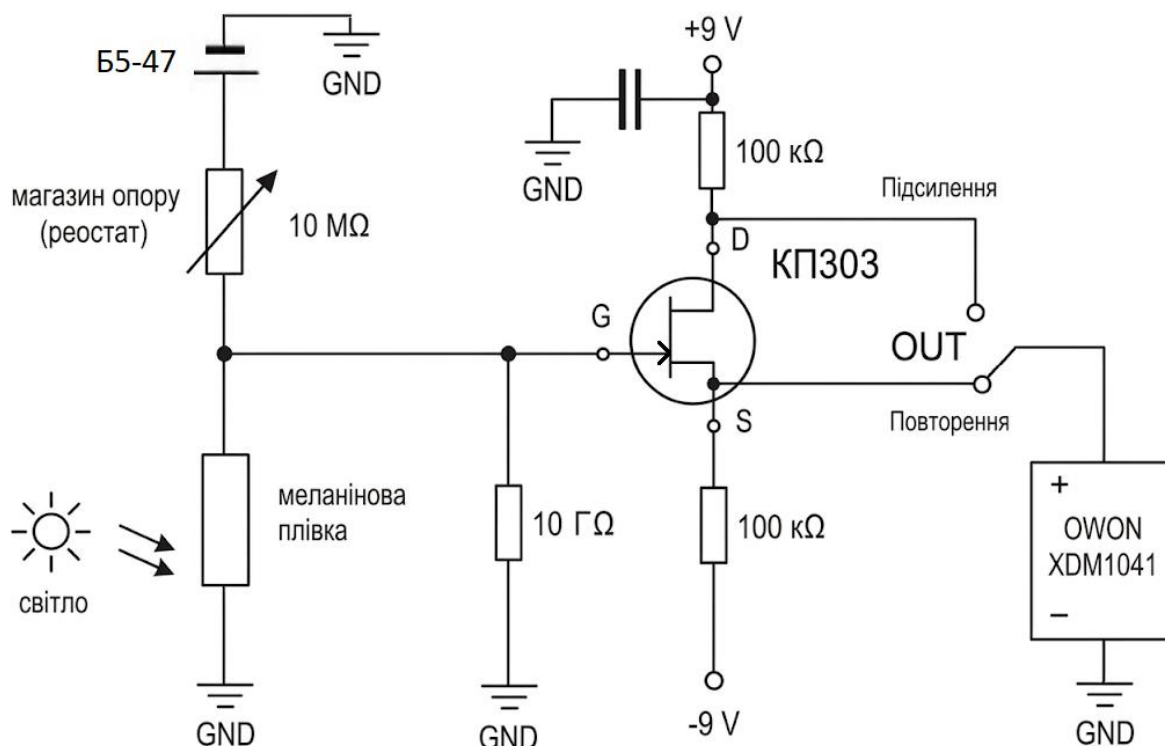


Рисунок 2.4 – Принципова схема установки для вимірювання фотовідгуку плівок меланіну

При вимірюванні електричних характеристик меланінових плівок основною перешкодою є проблема шунтування вимірюваного сигналу. Вона виникає через надвисокий опір досліджуваних зразків. При безпосередньому підключенні стандартного цифрового мультиметра до такого зразка вимірювальний прилад стає паралельним опором у колі. У такому випадку основна частина струму протікає через мультиметр, що призводить до критичного падіння напруги на вході приладу та повної втрати корисної інформації про фотовідгук.

Розроблена схема являє собою електрометричний буферний підсилювач, побудований на JFET. Її головне завдання – розв’язати проблему шунтування шляхом трансформації опору: вхідний опір каскаду (завдяки резистору великого номіналу в колі затвора) становить 10 ГОм, що дозволяє реєструвати сигнал без внесення суттєвих викривлень у вимірювальне коло.

Ліва частина, яка складається з джерела постійної напруги зміщення Б5-47, послідовно з'єднаного магазину опору (реостата на 10 МОм) та досліджуваної плівки меланіну, утворює подільник напруги. Реостат дозволяє підлаштовувати робочу точку подільника залежно від темного опору конкретного зразка. Основною частиною схеми є N-канальний JFET КП303. Сигнал з подільника подається на затвор (G - Gate). Резистор номіналом 10 ГОм (у скляній капсулі), підключений між затвором і землею (GND), забезпечує шлях для мікроскопічних струмів витоку затвора і формує надвисокий вхідний опір самого буфера. Транзистор живиться від двополярного джерела живлення ± 9 В (батарейка типу «Крона»). У колах стоку (D - Drain) та витоку (S - Source) встановлені балансуєчі резистори по 100 кОм. Конденсатор у колі +9 В слугує фільтром для придушення високочастотних завад по живленню. Схема реалізована навісним монтажем на керамічному багатовивідному корпусі 9-пінової вакуумної лампи для зменшення паразитної ємності і витоків наднизьких струмів. На виході сигнал фіксується цифровим мультиметром OWON XDM1041. Для запису сигналу була розроблена програма з інтерфейсом в середовищі Python.

В експерименті перемикач «OUT» переведений у нижнє положення – схема працює в режимі «Повторення». Сигнал знімається з витоку (S) транзистора. У цьому режимі схема працює як витоковий повторювач. Коефіцієнт підсилення за напругою приблизно дорівнює 1 (тобто напруга на виході практично дорівнює напрузі на вході). Коефіцієнт підсилення за струмом досягає великих значень. При верхньому положенні перемикача «Підсилення» сигнал знімається зі стоку (D) – це схема зі спільним витоком, яка інвертує сигнал і підсилює його за напругою.

У темновому режимі опір плівки меланіну максимальний. На подільнику напруги встановлюють певний постійний потенціал. Цей потенціал передається на затвор транзистора, і на виході мультиметра фіксують базову (темнову) напругу. При ввімкненні світла у плівці починається оптична генерація носіїв заряду. Опір меланіну падає, через це,

відповідно до закону Ома, падіння напруги на плівці зменшується. Це приводить до зменшення потенціалу на затворі. Оскільки схема працює в режимі повторювача, вихідна напруга на витоку (S) синхронно спадає, тому зміна корисного сигналу під час освітлення проявляється як зменшення напруги. Після вимкнення світла пастки для носіїв заряду в меланіні починають повільно вивільняти захоплені носії, опір плівки поступово зростає до темного значення, і напруга на виході буфера плавно повертається до початкового базового рівня.

2.3. Характеристики елементів схеми

2.3.1. Функціональний генератор імпульсів SDG1025

Серія SDG1000 – це генератор цифрових сигналів з вбудованими функціями довільної форми сигналу та імпульсів. Технологія DDS забезпечує точний, стабільний вихідний сигнал з низьким рівнем спотворення. Частота дискретизації 125 МГц, 14-бітна роздільна здатність. Сигнал: Квадрат: від 1 мкГц до 25 МГц, з амплітудою від 1 мВ до 10 В [22].

2.3.2. Осцилограф SDS1022dl

Номінальна напруга/частота: 100–240 Vrms, 50/60 Гц. 100–120 Vrms, 400 Гц. Номінальна вхідна потужність: 30 Вт МАКС. 2 канали, смуга пропускання: 40–150 МГц. Частота дискретизації в реальному часі: 1 Гвиб/с. Еквівалентна частота дискретизації: 50 Гвиб/с. Типи запуску: фронт, імпульс, відео, нахил та альтернативний. Автоматичне вимірювання тридцяти двох параметрів та підтримка всіх функцій вимірювання. Дві групи опорних сигналів та двадцять груп запису сигналів [23].

2.3.3. Джерело постійного струму Б5-47

Джерело живлення постійного струму Б5-47 призначене для живлення радіотехнічних пристроїв стабілізованою напругою і струмом в лабораторних умовах. Джерело може працювати як з ізольованим виходом, так і при заземленні клеми будь-якої полярності.

Згідно з технічною документацією приладу, величина вихідної напруги становить 0,1–29,9 В; струм навантаження 0,01–2,99 А; дискретність установки по напрузі 100 мВ, по струму 10 мА. Похибка установки складає для напруги $\pm (0,5\% U_{\text{уст}} + 0,1\% U_{\text{макс}})$ В, струму $\pm (1\% I_{\text{уст}} + 0,2\% I_{\text{макс}})$ А. Час встановлення робочого режиму при програмуванні становить 100 мс. Споживається потужність 400 Вт.

2.3.4. Магазин опорів МСР-63

Магазин опорів типу МСР-63 призначений для роботи в колах постійного струму. Магазин має значення опору від 0,035 до 111111,1 Ом. Основна похибка магазину при температурі 20 ± 2 °С не перевищує $\pm(0,05 + 0,02) \cdot m/R$, де m – число декад магазину; R – значення включеного опору, Ом.

2.3.5. Магазин опорів Р33

Магазин опорів Р33 застосовується в колах постійного струму. Магазин дозволяє отримувати опір від 0,1 до 99999,9 Ом. Робочий діапазон температур становить 10–30 °С, відносної вологості повітря 25–80%.

2.3.6. Цифровий мультиметр OWON XDM1041

Цифровий мультиметр OWON XDM1041 призначений для фіксації зміни напруги на зразку. Вибір даного приладу зумовлений його ключовими

технічними характеристиками. Висока роздільна здатність становить 0,001 мВ у діапазоні 50 мВ та 0,01 мВ у діапазоні 500 мВ. Вхідний опір приладу становить 10 МОм для стандартних діапазонів і понад 10 МОм для мілівольтових діапазонів. Для точного відстеження кінетики перехідних процесів прилад підтримує три режими швидкості оцифрування сигналу: «Low» (4 вим./с), «Mid» (16 вим./с) і «High» (65 вим./с). Прилад має вбудовану функцію автоматичного запису даних, що дозволяє автономно фіксувати до 1000 точок вимірювання [24].

2.3.7. Цифровий люксометр UNI-T UT381A

UNI-T UT381A – це цифровий прилад, який дозволяє вимірювати інтенсивність освітлення з широким діапазоном значень до 400000 лк. Використовується для вимірювання показань різних освітлювальних систем.

Технічні характеристики наведено у табл. 2.2 [25, 26].

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики люксометра UNI-T UT381A [25]

Сертифікати	CE, UKCA, RoHS	
Роздільна здатність	0~99,99 лк	0,01 лк
	100~999,9 лк	0,1 лк
	1000~400000 лк	1 лк
Точність	±3% калібрування стандартним джерелом світла з температурою 2856 К	
	±6% калібрування з іншим джерелом світла	

2.4. Програмне забезпечення

2.4.1. Origin

OriginLab випускає ПЗ для побудови графіків та аналізу даних. Ці продукти підходять для науковців та інженерів, оскільки дозволяють створювати графіки, професійно представляти дані та аналізувати їх. Origin набуває все більшої популярності з 1992 року, маючи першість у функціоналі серед подібних програм для побудови графіків та аналізу даних. Наявні різні види ліцензій, зокрема безкоштовна версія для студентів на 6 місяців [27].

2.4.2. Python

Python – це високорівнева мова програмування загального призначення, яка вирізняється читабельністю коду, його простотою та легкістю написання. Вона підтримує кілька парадигм програмування з акцентом на об'єктно-орієнтоване програмування та динамічну типізацію. Python отримав широке використання в спільноті машинного навчання. З 2003 року Python стабільно входить до десятки найпопулярніших мов програмування [28].

2.5. Методичний підхід

2.5.1. Принцип вимірювання на установці для вимірювання фотовідгуку фоторезисторів

Перед початком вимірювань необхідно розмістити зразок на зондовій установці та під'єднати його до електричного кола. Після цього вмикають функціональний генератор, осцилограф та джерело зміщення. Для забезпечення лінійного режиму роботи фоторезистора та стійкої

синхронізації сигналу на функціональному генераторі потрібно встановити сигнал прямокутної форми (меандр). На функціональному генераторі необхідно вибрати амплітуду модуляції і частоту так, щоб період сигналу перевищував характерний час релаксації зразка τ (з'являється плато фотовідгуку у фазі освітлення). На джерелі зміщення Б5-47 встановити напругу, допустиму для безпечного вимірювання зразка. Опір навантажувального резистора МСР-63 підібрати так, щоб він забезпечував максимальну чутливість вимірювальної схеми до зміни концентрації носіїв заряду в активній фазі фотовідгуку (отримання максимальної амплітуди фотовідгуку на осцилографі). Для реєстрації сигналу ввімкнути джерело світла (RGB-світлодіод) – під'єднати до генератора. За допомогою цифрового осцилографа зареєструвати часову залежність падіння напруги на зразку (Канал В). Отримані осцилограми зберегти у цифровому форматі *.csv для подальшого аналізу. Повторити вимірювання за інших режимів роботи RGB-світлодіоду.

2.5.2. Принцип вимірювання на установці для вимірювання фотовідгуку плівок меланіну

Перед початком вимірювань необхідно розмістити зразок на зондовій установці та під'єднати його до електричного кола. Після цього вмикають мультиметр, підсилювач та джерело зміщення. Для забезпечення лінійного режиму роботи фоторезистора та стійкої синхронізації сигналу потрібно встановити світловий сигнал із заданою освітленістю і встановити модулятор. На джерелі зміщення Б5-47 встановити напругу на основі значення товщини плівки для уникнення пробоя. Опір навантажувального резистора R33 підібрати так, щоб він забезпечував максимальну чутливість вимірювальної схеми до зміни концентрації носіїв заряду в активній фазі фотовідгуку. Для реєстрації сигналу необхідно ввімкнути джерело білого світла. За допомогою мультиметра і комп'ютерної програми зареєструвати

часову залежність падіння напруги на зразку. Отримані результати зберегти у цифровому форматі *.csv для подальшого аналізу.

2.5.3. Обробка даних

Отримані в ході експерименту осцилограми, які являють собою масиви значень напруги у цифровій формі, підлягають подальшій математичній обробці для визначення параметрів релаксації. Спочатку відбувається перерахунок миттєвих значень напруги у відносні значення фотовідгуку. Оскільки реєстрацію кінетики сигналу здійснювали за схемою дільника напруги, де досліджуваний зразок було підключено послідовно з навантажувальним опором, збільшення провідності зразка під дією світла приводить до зменшення падіння напруги на ньому. Для коректного аналізу експериментальні криві падіння напруги $U(t)$ нормують та інвертують по осі Y . Розрахунок часу життя неосновних носіїв заряду проводять окремо для кривих наростання і спаду відносної величини фотовідгуку. Його амплітуда лінійно залежить від величини фотоструму, тому є прямо пропорційною до концентрації нерівноважних носіїв заряду Δn , згенерованих світлом. Для визначення часу наростання і спадання фотовідгуку τ було використано формули (1.3)–(1.4).

Для апроксимації були вибрані функції, які максимально наближено відображають зміну концентрації неосновних носіїв заряду при ввімкненні та вимкненні світла від часу: функція експоненціального зростання

$$y(t) = y_0 + A_1 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_1}\right)\right), \quad (2.1)$$

і функція експоненціального спадання

$$y(t) = y_0 + A_2 \cdot \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_2}\right), \quad (2.2)$$

де $y(t)$ – апроксимоване значення сигналу у момент часу t , y_0 – базовий рівень сигналу, A_1, A_2 – амплітуда сигналу, t_0 – момент часу, який відповідає

початку процесу, τ_1 , τ_2 – шукана величина часу життя нерівноважних носіїв заряду (час, за який сигнал змінюється в e разів).

Автоматизація процесу визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду була здійснена за допомогою розробленого ПЗ мовою програмування Python. Необхідність створення власного ПЗ була зумовлена неточністю стандартних пакетів аналізу (наприклад, Origin), які часто видають фізично некоректні параметри. Розроблена програма вирішує зазначену проблему шляхом жорсткого задання фізичних обмежень на параметри апроксимації. Інтерфейс програми, який представлено на рис. 2.5, включає: інформацію про моделі, які розраховують за формулами (2.1)–(2.2) (розташовується вгорі); інформацію про параметри та коротку інструкцію (розташовується ліворуч); поле для побудови графіка (розташовується по центру); консоль (розташовується під графіком); кнопки (розташовуються під консоллю).

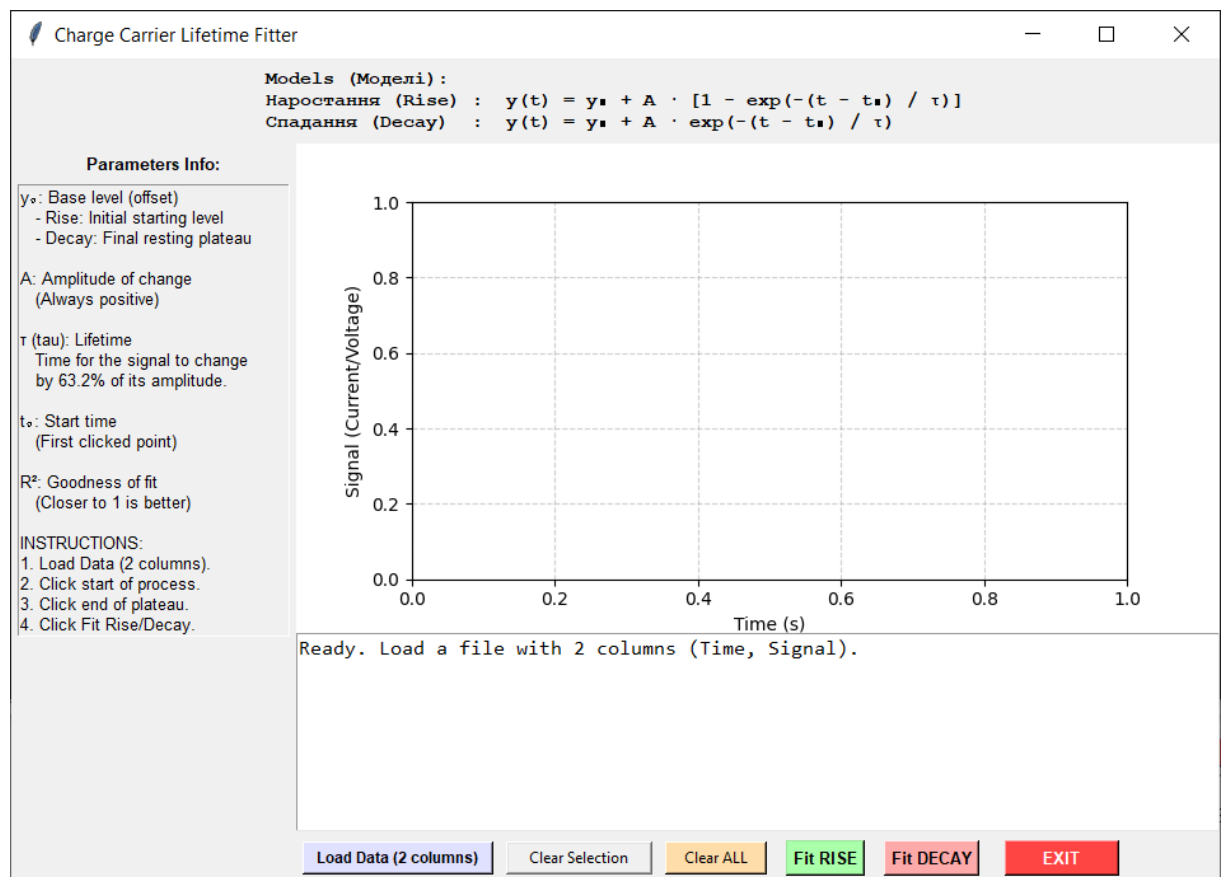


Рисунок 2.5 – Інтерфейс програми для визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду

Програма реалізована у вигляді десктопного додатка з графічним інтерфейсом користувача (GUI). Для її створення було використано кілька бібліотек мови Python. Бібліотека Tkinter необхідна для побудови графічного інтерфейсу (вікна, кнопки, текстові панелі). Бібліотеку Matplotlib використано для інтерактивної візуалізації експериментальних кривих та результатів математичного моделювання. Бібліотека NumPy виконує функцію швидкої та ефективної роботи з масивами числових даних. Бібліотека SciPy реалізує алгоритм нелінійної апроксимації методом найменших квадратів.

Алгоритм роботи з програмою полягає у наступному.

1. Імпорт даних. Натискаючи на кнопку Load Data, відкривається файловий менеджер, де можна обрати необхідний текстовий файл у форматі *.txt або *.csv, який містить два стовпчики: час t та величину сигналу y . Програма автоматично зчитує масиви та будує вихідний графік.
2. Інтерактивна вибірка. Оскільки зазвичай файл містить дані для темного і світлого режимів, ПЗ побудоване так, щоб користувач за допомогою комп'ютерної миші міг виділяти на графіку потрібну ділянку. Програма використовує алгоритм «прилипання» (snap-to-data), автоматично знаходячи найближчу реальну експериментальну точку до місця кліку, що нівелює похибку ручного введення.
3. Апроксимація. Після вибору необхідних точок необхідно натиснути на кнопку Fit RISE для освітленої ділянки або Fit DECAY для темної ділянки. Алгоритм підбирає оптимальні значення y_0 , A і τ , які виводяться у консоль під графіком. Для перевірки того, наскільки добре експоненціальна модель описує реальний фізичний процес, програма розраховує коефіцієнт детермінації R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f(t_i))^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.3)$$

Чим ближче він до 1, тим краще апроксимація відповідає експериментальним даним.

4. Очищення даних. Якщо користувачу необхідно обрати іншу ділянку, він може натиснути кнопку Clear Selection, після чого вибрані точки початку і кінця ділянки зникнуть. Якщо користувачу необхідно завантажити нові дані, він може натиснути кнопку Clear ALL, після чого очиститься весь графік.
5. Завершення роботи. Щоб вийти з програми, можна натиснути «хрестик» угорі справа програми або кнопку EXIT під консоллю.

2.6. Висновки до розділу 2

Для виконання поставлених завдань дослідження було сформовано експериментальну базу та розроблено відповідний математичний апарат.

1. Зібрано та налаштовано експериментальну установку для вимірювання кінетичних характеристик фотовідгуку. Вимірювальну установку налаштовували так, щоб забезпечити необхідну точність для фіксації перехідних процесів (наростання та спададання фотовідгуку).
2. Як еталонні зразки було обрано промислові фоторезистори СФ2-2 (на основі CdS) та СФ3-2Б (на основі CdSe), які дозволяють апробувати методику розрахунку часу життя нерівноважних носіїв заряду.
3. Для плівок меланіну схему було ускладнено додаванням повторювача на основі N-канального JFET КП303.
4. Обґрунтовано методику та математично описано визначення часу життя неосновних носіїв заряду (τ) на основі аналізу експоненціальної ділянки кривої релаксації фотовідгуку.
5. Розроблено власне ПЗ для автоматизації обрахунків часу життя нерівноважних носіїв заряду.

Розділ 3.

Експериментальні результати та їх обговорення

3.1. Експериментальне дослідження фотовідгуку фоторезисторів

У роботі проведено дослідження фотовідгуку фоторезисторів, виготовлених з різних матеріалів, шляхом вимірювання їхнього сигналу на включення та вимикання освітлення. Як збуджуючий сигнал використовували прямокутні імпульси світла, що дозволило чітко виділити процеси наростання та спаду. Сигнали було знято з осцилографа при заданих умовах живлення та навантаження, після чого виконано математичну обробку даних.

3.1.1. Калібрування установки

Для визначення часу життя неосновних носіїв заряду було досліджено фоторезистори СФ2-2 і СФ3-2Б у трьох режимах освітлення – червоний (R), зелений (G) і синій (B). Для забезпечення однакової інтенсивності світла було виміряно вольт-люксові характеристики. Для цього була зібрана установка, що складалася з функціонального генератора, на якому виставляли напругу на досліджуваному RGB-світлодіоді, та люксметра UNIT UT381A, за допомогою якого вимірювали інтенсивність світла. Вимірювання проводили у затемненому приміщенні для уникнення впливу стороннього освітлення. Фотосенсор люксметра розташовували на фіксованій відстані від RGB-світлодіоду. Напругу на кожен режим RGB-світлодіоду подавали з кроком 0,1 В. Для кожного значення напруги U фіксували відповідне значення освітленості E_v на люксметрі (рис. 3.1, табл. 3.1). Було виявлено, що порогова напруга залежить від кольору. Поріг вимикання для синього світлодіоду становить 5 В, для зеленого – 4,5 В, для червоного – 4 В. З таблиці видно, що однакову освітленість 41 лк можемо

досягти, виставляючи напругу 4,9 В для червоного світла, 5,0 В для зеленого і 5,7 В для синього.

Таблиця 3.1 – Вольт-люксові характеристики RGB-світлодіоду

U	E_v	U	E_v	U	E_v
В	лк	В	лк	В	лк
Червоний колір (R)		Зелений колір (G)		Синій колір (B)	
4	12	4,5	5	5	0
4,1	16	4,6	11	5,1	2
4,2	19	4,7	17	5,2	6
4,3	22	4,8	25	5,3	10
4,4	26	4,9	33	5,4	15
4,5	29	5	41	5,5	23
4,6	32	5,1	51	5,6	32
4,7	35	5,2	59	5,7	41
4,8	38	5,3	67	5,8	50
4,9	41	5,4	76	5,9	58
5	44	5,5	84	6	66

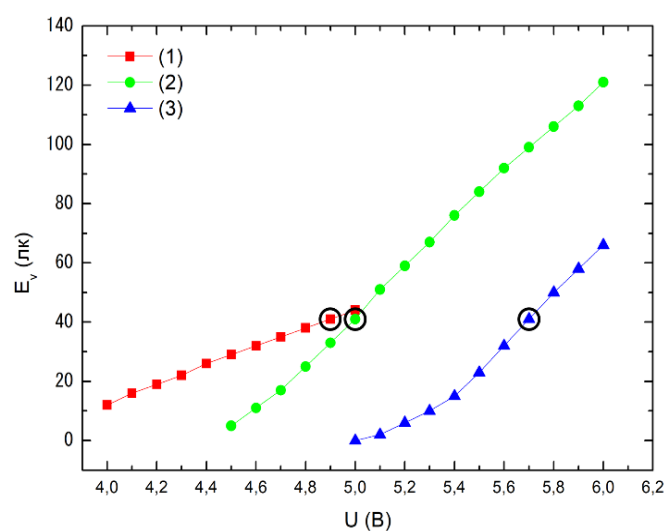


Рисунок 3.1 – Вольт-люксові характеристики RGB-світлодіоду у різних режимах: (1) – R, (2) – G, (3) – B

Отримані залежності дозволяють оцінити відносну потужність випромінювання різних LED-джерел і далі використовувати ці дані для порівняльних досліджень фотовідгуку зразків під освітленням у різних спектральних діапазонах з однаковою інтенсивністю освітлення.

3.1.2. Результати досліджень фоторезисторів СФ2-2 і СФ3-2Б

Для дослідження кінетики релаксації при різних довжинах хвиль освітлення графічні залежності фотовідгуку (рис. 3.2, 3.3) представлено у нормованому вигляді. Таке представлення дозволяє візуально оцінити та порівняти форму кривих наростання і спаду сигналу. Кількісний аналіз амплітуди фотоелектричного відгуку представлено у табл. 3.2, 3.3. У них наведено абсолютні значення зміни напруги на навантаженні, розраховані на основі первинних осцилограм. Ці дані використовували для визначення спектральної чутливості зразків.

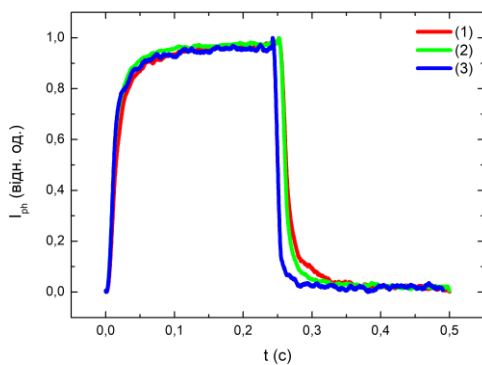


Рисунок 3.2 – Нормовані кінетичні залежності фотовідгуку фоторезистора СФ2-2 у різних режимах: (1) – R, (2) G, (3) – B

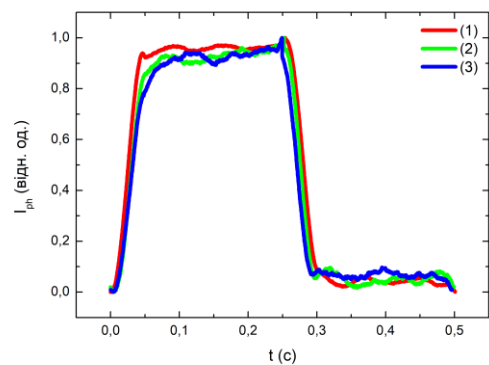


Рисунок 3.3 – Нормовані кінетичні залежності фотовідгуку фоторезистора СФ3-2Б у різних режимах: (1) – R, (2) G, (3) – B

Фоторезистор СФ2-2 реагує найшвидше на синє світло і найповільніше на червоне (рис. 3.2, табл. 3.2). Часи наростання і спадання для червоного

світла становлять відповідно 18 мс і 12 мс, зеленого – 12 мс і 10 мс, синього – 10 мс і 7 мс. Найбільша амплітуда напруги спостерігається для зеленого світла, найменша – для синього. Червоне світло дає середній результат, близький до зеленого. Було експериментально підтверджено паспортну спектральну характеристику фоторезистора: він є мілісекундним фотоприймачем, пік чутливості якого лежить у зеленій частині спектру. Швидкість його роботи залежить від довжини хвилі. Для всіх трьох кольорів світла час наростання виявився довшим, ніж час спадання. Така стабільність вказує на наявність мілких пасток у матеріалі CdS. Носії повільно генеруються, але швидко звільняються з дефектів після вимкнення світла, що створює швидку рекомбінацію.

Таблиця 3.2 – Апроксимація часу наростання і спадання для фоторезистора СФ2-2 (CdS)

Напруга зміщення	Опір наванта- ження	Частота	Колір	Наростання		Спад	
				A ₁ , В	τ ₁ , мс	A ₂ , В	τ ₂ , мс
5 В	5 кОм	2 Гц	Червоний	1,25	18	1,25	12
5 В	5 кОм	2 Гц	Зелений	1,3	12	1,4	10
5 В	5 кОм	2 Гц	Синій	0,75	10	0,85	7

Чутливість фоторезистора СФ3-2Б найвища для червоного світла і найнижча для синього та зеленого (рис. 3.3, табл. 3.3). Це узгоджується з тим, що пік чутливості цього фоторезистора лежить у ближній ІЧ-області, тому червоне світло дає найсильніший відгук. Усі часи життя неосновних носіїв заряду знаходяться в діапазоні 20–40 мс: часи наростання і спадання для червоного світла становлять відповідно 20 мс і 29 мс, для зеленого – 34 мс і 21 мс, для синього – 38 мс і 24 мс. Фізика процесу змінюється залежно від кольору світла. Для червоного світла час наростання менше за час спаду, що вказує на домінування глибоких пасток. Процес обмежений повільним

звільненням носіїв з цих пасток. Для зеленого та синього світла часи наростання більші за часи спадання, тому тут домінують мілкі пастки. Процес обмежений повільним заповненням цих пасток. Експеримент показує, що фоторезистор СФЗ-2Б має пік чутливості у червоній області і що фотони з різними енергіями (різними кольорами) взаємодіють з різними наборами дефектів у матеріалі, що приводить до принципово різної динаміки наростання та спаду фотоструму.

Таблиця 3.3 – Апроксимація часу наростання і спадання для фоторезистора СФЗ-2Б (CdSe)

Напруга зміщення	Опір наванта- ження	Частота	Колір	Наростання		Спад	
				A ₁ , В	τ ₁ , мс	A ₂ , В	τ ₂ , мс
8 В	50 кОм	2 Гц	Червоний	2,3	20	2,1	29
8 В	50 кОм	2 Гц	Зелений	1,1	34	1	21
8 В	50 кОм	2 Гц	Синій	1	38	0,5	24

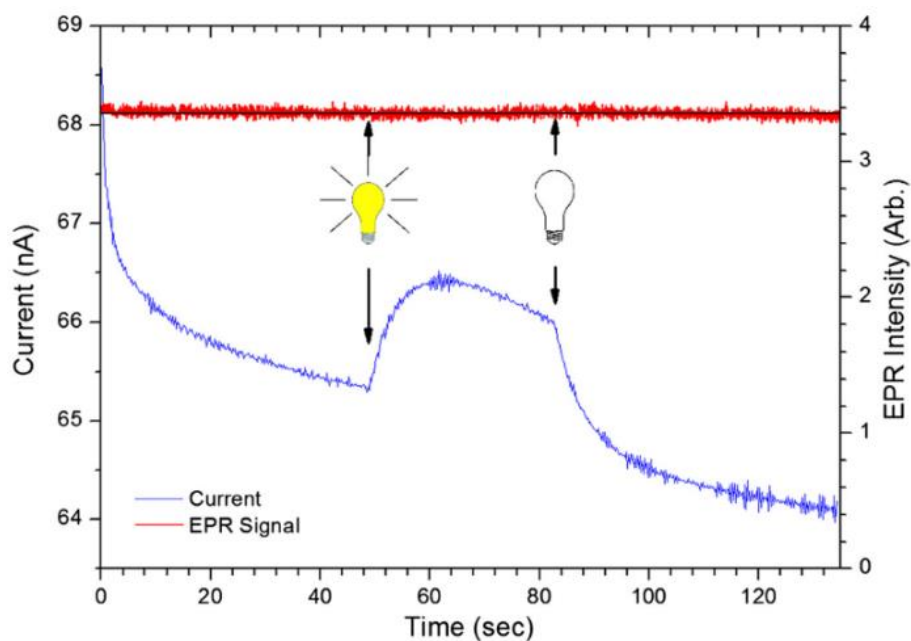
3.2. Розрахунок параметрів фотовідгуку меланіну з літературних даних

У цьому підрозділі було розраховано часи наростання та спадання для зразків меланіну. Вихідними даними слугували експериментальні графіки залежності фотоструму перехідних процесів увімкнення і вимкнення світла, опубліковані в роботах [3, 11, 29]. Оскільки оригінальні статті наводять лише візуальні залежності без вказівки точних числових значень кінетичних коефіцієнтів, було проведено оцифрування відповідних кривих. Отримані масиви даних були апроксимовані за допомогою розробленого ПЗ за формулами (2.1)–(2.2). Розраховані значення часу життя τ дозволяють порівняти динамічні характеристики різних типів матеріалів (табл. 3.4).

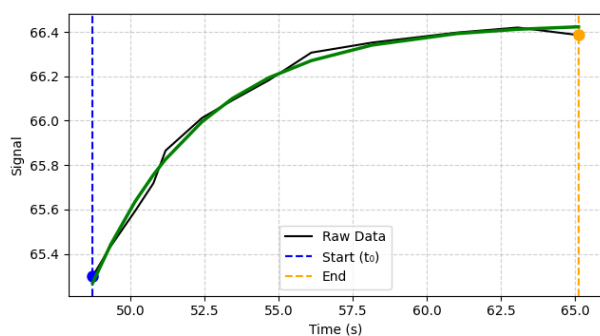
Таблиця 3.4 – Апроксимація графіків залежності фотоструму від часу експоненціальними функціями для зразків меланіну

Джерело	Зростання			Спадання		
	y_0	A_1	τ_1	y_0	A_2	τ_2
[3]	65 нА	1,2 нА	3,8 с	64 нА	1,8 нА	8,6 с
[29]	5,1 нА	11 нА	11 с	6,4 нА	12 нА	13,8 с
[11]	-0,48 мА	3,0 мА	13,7 с	0,07 мА	2,6 мА	5,2 с

У зразку меланіну у вигляді гранул (рівень гідратації 7,6%) [3] на рис. 3.4 процес спадання струму (рекомбінації носіїв) відбувається більш ніж удвічі повільніше, ніж процес наростання (генерації носіїв). Це є ознакою стійкої фотопровідності, яка викликана повільним звільненням носіїв заряду з глибоких пасток у матеріалі. На рис. 3.5 представлена кінетика фотоструму для DOPA-меланіну [29]. У зразку часи наростання і спадання близькі за значеннями. Це вказує на те, що ефект глибоких пасток, який був очевидний у першому зразку, тут набагато менш виражений. Для зразку меланіну, якому відповідає зелена крива на рис. 3.6 [11], спостерігається процес наростання струму майже у 2,5 рази повільніше, ніж процес спадання. Коли вмикається світло, фотони генерують носії заряду. Однак ці носії одразу ж потрапляють у пастки. Струм досягає свого максимального стабільного значення лише тоді, коли всі ці пастки заповнюються. Процес заповнення пасток сповільнює наростання струму. При вимкненні світла генерація припиняється. Носії, що перебували у пастках, швидко з них звільнюються і рекомбінують. Це вказує на домінуючу роль мілких пасток: вони легко захоплюють носії і легко їх відпускають. Це принципово інша поведінка, ніж на першому графіку, де спадання було повільним через наявність глибоких пасток.

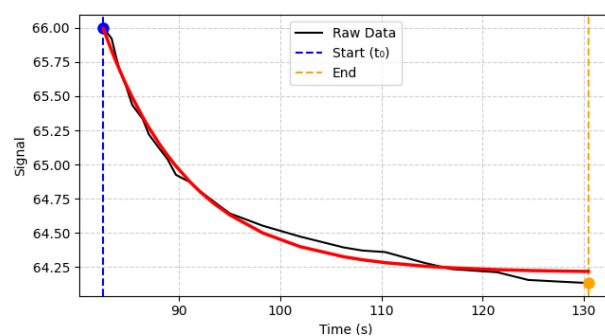


a)



Range: 48.7372 s to 65.1195 s
 y_0 (offset) = 6.5269×10^1
 A (amplitude) = 1.1699×10^0
 τ (lifetime) = 3.7997×10^0 seconds
 t_0 (start time) = 4.8737×10^1 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9949

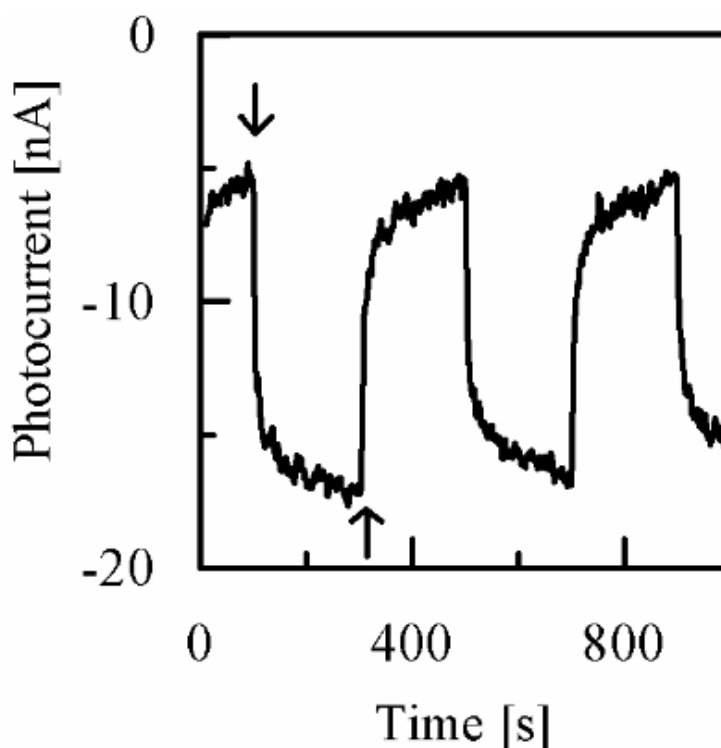
б)



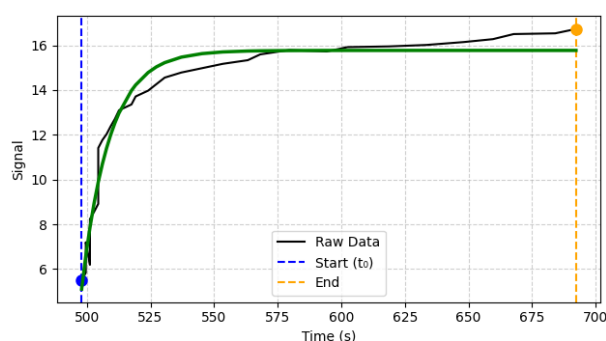
Range: 82.5256 s to 130.4437 s
 y_0 (offset) = 6.4212×10^1
 A (amplitude) = 1.7833×10^0
 τ (lifetime) = 8.6435×10^0 seconds
 t_0 (start time) = 8.2526×10^1 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9929

в)

Рисунок 3.4 – Часова залежність струму для зразка меланіну у вигляді гранул. а) Оригінальний графік з роботи [3]. Результати апроксимації кривих фотовідгуку експонціальними функціями (2.1)–(2.2): б) час наростання $\tau = 3,8$ с, в) час спадання $\tau = 8,6$ с. Амплітуду масштабовано на множник 10^9

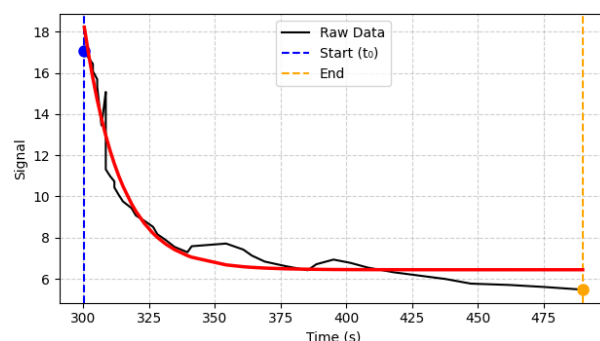


a)



Range: 497.9592 s to 692.2449 s
 y_0 (offset) = 5.1056×10^0
 A (amplitude) = 1.0663×10^1
 τ (lifetime) = 1.0982×10^1 seconds
 t_0 (start time) = 4.9796×10^2 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9624

б)

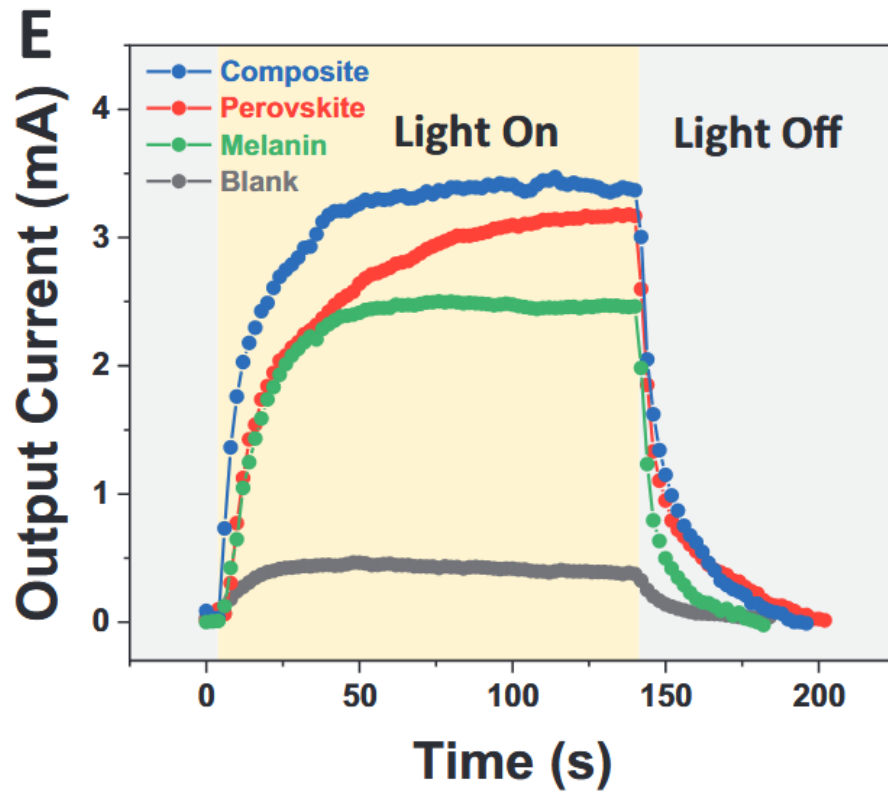


Range: 300.4082 s to 489.7959 s
 y_0 (offset) = 6.4435×10^0
 A (amplitude) = 1.1771×10^1
 τ (lifetime) = 1.3783×10^1 seconds
 t_0 (start time) = 3.0041×10^2 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9495

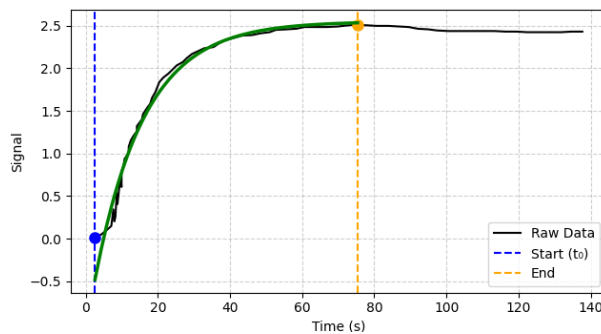
в)

Рисунок 3.5 – Часова залежність струму для композитної плівки DOPA-меланіну. а) Оригінальний графік з роботи [29]. Світло: ↓ – вмикається, ↑ – вимикається. Результати апроксимації кривих фотовідгуку експонціальними функціями (2.1)–(2.2): б) час наростання $\tau = 11$ с, в) час спадання $\tau = 13,8$ с.

Амплітуду масштабовано на множник 10^9

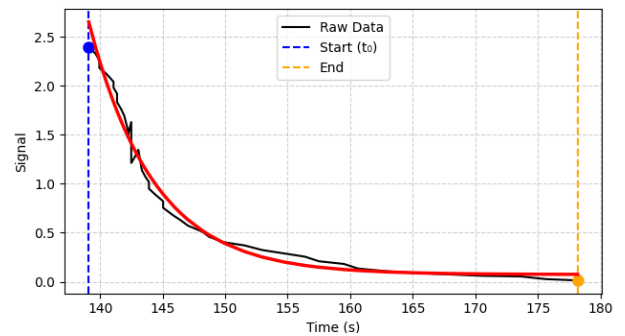


a)



Range: 2.5496 s to 75.3541 s
 y_0 (offset) = -4.8339×10^{-1}
 A (amplitude) = 3.0330×10^0
 τ (lifetime) = 1.3738×10^1 seconds
 t_0 (start time) = 2.5496×10^0 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9809

б)



Range: 139.0935 s to 178.1870 s
 y_0 (offset) = 7.3931×10^{-2}
 A (amplitude) = 2.5768×10^0
 τ (lifetime) = 5.1906×10^0 seconds
 t_0 (start time) = 1.3909×10^2 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9823

в)

Рисунок 3.6 – Часова залежність струму для термоелектричних пристроїв, покритих різними матеріалами. а) Оригінальний графік з роботи [11].
 Результати апроксимації кривих фотовідгуку експонціальними функціями (2.1)–(2.2) для меланіну (зелена лінія): б) час наростання $\tau = 13,7$ с, в) час спадання $\tau = 5,2$ с. Амплітуду масштабовано на множник 10^6

Розраховані на основі даних з літературних джерел часи життя нерівноважних носіїв заряду плівок меланіну, отриманих різними методами, відрізняються від часів життя нерівноважних носіїв заряду, розрахованих для напівпровідникових фоторезисторів, на 3 порядки. Це підтверджує думку про те, що у меланіні носії заряду дуже сильно локалізовані й рухаються повільно, тому процес релаксації фотоструму відбувається значно довше, ніж у класичних неорганічних фоторезисторах [9, 10].

3.3. Експериментальне дослідження фотовідгуку плівок меланіну

Для визначення часу життя τ нерівноважних носіїв заряду у плівках меланіну було проведено вимірювання фотовідгуку при напругах зміщення 1 В і 1,1 В. Нормовані кінетичні криві на рис. 3.7 відображають часові залежності вихідної напруги на підсилювачі під час увімкнення і вимкнення світла.

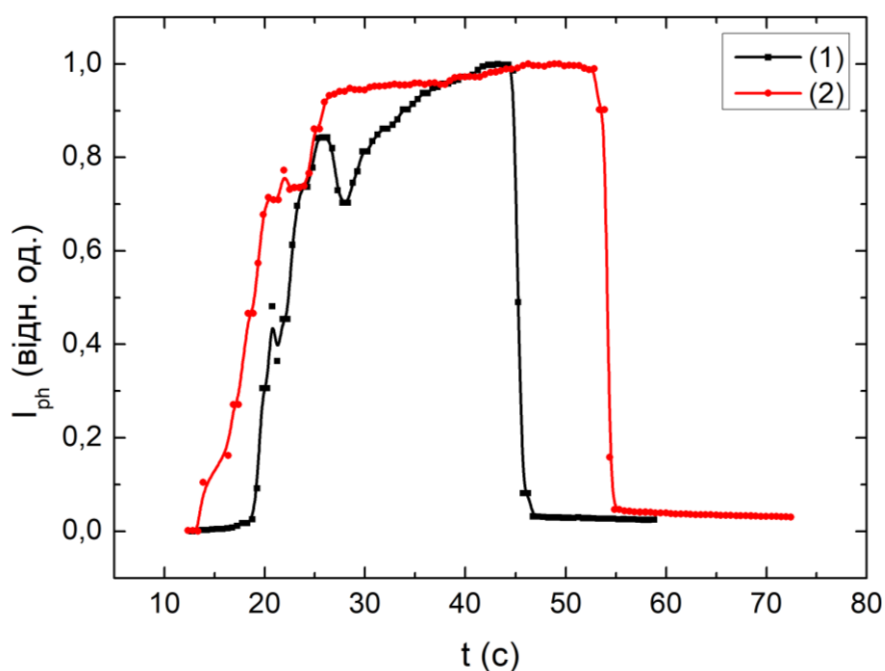


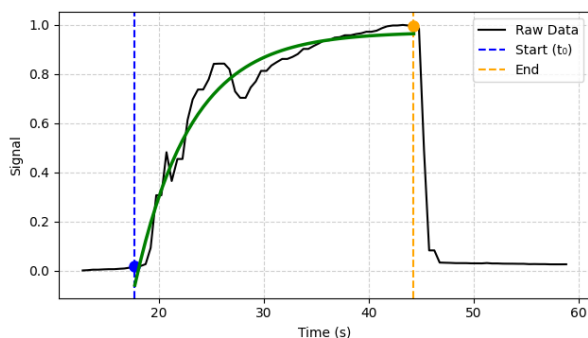
Рисунок 3.7 – Нормовані кінетичні залежності фотовідгуку плівок меланіну при напругах зміщення: (1) – 1 В, (2) – 1,1 В

У темновій фазі модуляції світлом фіксується стабільний базовий рівень напруги. У цьому стані опір плівки меланіну є максимальним, усі глибокі та мілкі пастки знаходяться в термодинамічній рівновазі.

Джерелом освітлення слугував білий світлодіод, колірна температура якого 5000 К. Спектр емісії даного джерела є неперервним, охоплює весь видимий діапазон довжин хвиль (від 400 до 700 нм). У момент подачі світлового імпульсу білого світла з інтенсивністю 2000 лк спостерігається різка зміна сигналу. На графіку це відображається як спад напруги. Під дією фотонів відбувається генерація вільних носіїв заряду. Опір плівки меланіну різко падає, що приводить до зменшення падіння напруги на зразку в колі вимірювального подільника. Оскільки підсилювач працює в режимі витокового повторювача, це фіксується як зменшення вихідного сигналу. Процес досягнення максимуму фотовідгуку не є миттєвим. Час наростання безпосередньо залежить від прикладеної напруги зміщення (рис. 3.8). При напрузі зміщення 1,0 В цей час становить близько 5,3 с, а при збільшенні напруги до 1,1 В він зростає до 7,2 с. Характерний час наростання фотоструму в меланіні є досить значним, що безпосередньо пов'язано з особливостями транспорту заряду в цьому біополімері: визначальним є вплив локалізованих станів та процеси захоплення нерівноважних носіїв заряду глибокими пастками [9, 10]. Після завершення перехідного процесу крива виходить на насичення: процеси фотогенерації та рекомбінації носіїв заряду врівноважуються. Амплітуда фотовідгуку нелінійно залежить від напруги зміщення: збільшення напруги зміщення на 10% (з 1,0 В до 1,1 В) приводить до зростання амплітуди сигналу приблизно на 30%, що вказує на залежність ефективності збору заряду від величини електричного поля.

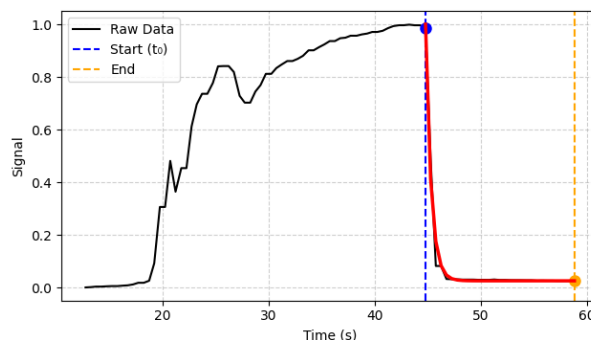
Після того, як вимикають освітлення, починається процес повернення системи до початкового темного стану. На графіку спостерігається асиметрія кінетики: форма кривої спаду суттєво відрізняється від кривої наростання. Процес релаксації демонструє стрімкий спад тривалістю близько

0,5 с при 1,0 В та 1,2 с при 1,1 В, що відповідає швидкій рекомбінації вільних носіїв заряду.



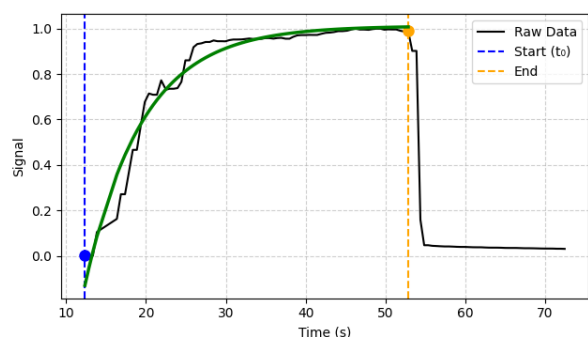
Range: 17.7394 s to 44.2808 s
 y_0 (offset) = -5.9763×10^{-2}
 A (amplitude) = 1.0312×10^0
 τ (lifetime) = 5.3497×10^0 seconds
 t_0 (start time) = 1.7739×10^1 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9520

а)



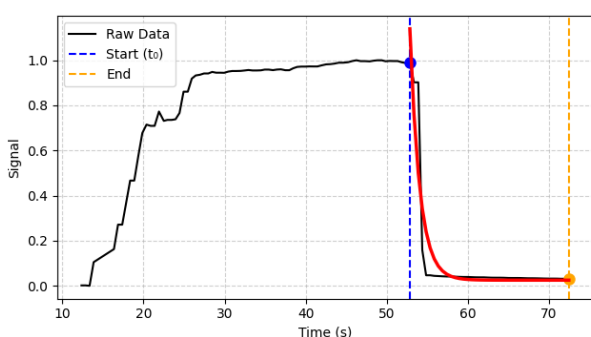
Range: 44.7805 s to 58.7958 s
 y_0 (offset) = 2.5107×10^{-2}
 A (amplitude) = 9.7668×10^{-1}
 τ (lifetime) = 5.1820×10^{-1} seconds
 t_0 (start time) = 4.4781×10^1 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9853

б)



Range: 12.3490 s to 52.8431 s
 y_0 (offset) = -1.3033×10^{-1}
 A (amplitude) = 1.1422×10^0
 τ (lifetime) = 7.1917×10^0 seconds
 t_0 (start time) = 1.2349×10^1 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.9644

в)



Range: 52.8431 s to 72.4438 s
 y_0 (offset) = 2.4820×10^{-2}
 A (amplitude) = 1.1146×10^0
 τ (lifetime) = 1.2180×10^0 seconds
 t_0 (start time) = 5.2843×10^1 seconds
 R^2 (fit qual.) = 0.8649

г)

Рисунок 3.8 – Результати апроксимації експериментальних залежностей фотовідгуку експонціальними функціями (2.1)–(2.2) при прикладеній напрузі зміщення: 1 В – а), б); 1,1 В – в), г)

Отримані в ході експерименту значення часу життя нерівноважних носіїв заряду для плівок меланіну за порядком величини узгоджуються з літературними даними. Це свідчить про коректність проведених вимірювань

та дозволяє ідентифікувати фізичну природу і механізми транспорту носіїв у досліджуваних плівках меланіну. Наявність довготривалих процесів наростання і спадання фотовідгуку свідчить про те, що макромолекулярна структура меланіну функціонує як класичний аморфний органічний напівпровідник. Ці фізичні процеси повністю узгоджуються з моделлю MDAS, відповідно до якої краї дозволених зон розмиваються через структурну неупорядкованість, утворюючи в забороненій зоні центри прилипання та глибокі дефекти [9, 10].

3.4. Висновки до розділу 3

Після проведення експериментальних досліджень та розрахунків було отримано наступні результати.

1. Проведено калібрування експериментальної установки для фоторезисторів, за результатами якого встановлено робочий рівень освітленості величиною 41 лк, що забезпечило відтворюваність вимірювань фотовідгуку.
2. Експериментально досліджено кінетику фотовідгуку еталонних фоторезисторів. Розрахований час життя неосновних носіїв заряду лежить у межах 7–18 мс для СФ2-2 (на основі CdS) та 20–38 мс для СФ3-2Б (на основі CdSe), що є типовим для цих фоторезисторів.
3. На основі даних літературних джерел обчислено час життя носіїв заряду для різних структур меланіну, який склав порядку 10 с.
4. Експериментально досліджено кінетику фотовідгуку отриманих зразків меланіну при освітленні 2000 лк. Результати підтвердили наявність фотовідгуку і продемонстрували час життя неосновних носіїв заряду порядку 10 с, що добре узгоджується з літературними даними.
5. На основі аналізу кінетичних кривих фотоструму встановлено особливості провідності тонких плівок меланіну, які свідчать про суттєву роль локалізованих станів та стрибкового механізму

транспорту носіїв заряду, які є характерними для неупорядкованих напівпровідникових систем. Отримані результати узгоджуються з моделлю MDAS.

6. Порівняльний аналіз кінетичних параметрів показав, що час життя носіїв заряду в плівках меланіну на 3 порядки більший, ніж у неорганічних фоторезисторах з CdS і CdSe. Це підтверджує визначальний вплив аморфної органічної природи меланіну на його електронні властивості та дозволяє оцінити межі його застосування в біосумісній оптоелектроніці.

Висновки

Меланін – це біополімер з широким спектром поглинання, що має унікальні фізичні й хімічні властивості. Завдяки ефективному поглинанню світла в широкому спектральному діапазоні, стабільності до зовнішніх впливів і біосумісності меланін є перспективним функціональним матеріалом для органічної електроніки, сенсорики та фотовольтаїки, але для подальшого прогресу необхідні контроль структури, стандартизація синтезу та порівняльні електричні вимірювання.

Фотопровідність меланіну визначається як зростання електропровідності під дією світла, що супроводжується участю стрибкових механізмів переносу заряду та може бути посилена зміною вологості, структури або типу опромінення. Встановлено, що меланін проявляє помітний фотоелектричний відгук, однак процеси генерації та рекомбінації носіїв заряду в ньому значно повільніші на відміну від напівпровідникових аналогів через велику кількість структурних дефектів та пасток.

Було розроблено методику дослідження фотовідгуку плівок меланіну, яка складається з експериментальної установки для вимірювання кінетики фотовідгуку та методів розрахунку часу життя неосновних носіїв заряду.

Реалізовано систему стабілізованого освітлення на базі RGB-світлодіоду. Проведено вимірювання вольт-люксових характеристик і визначено робочий рівень освітленості 41 лк для всіх спектральних діапазонів (червоного, зеленого, синього). Перевірку методики було проведено на еталонних зразках, що підтвердило її придатність для реєстрації слабких фотоелектричних сигналів та визначення часових характеристик релаксації фотовідгуку фоторезисторів. Після чого схему було доповнено польовим транзистором і резистором з великим номіналом, що дозволило виміряти фотовідгук високоомних плівок меланіну.

Отримані дані часів життя неосновних носіїв заряду фоторезисторів, що становлять порядку кількох десятків мілісекунд, збігаються з

паспортними даними, що вказує на коректність проведеного експерименту. Було виявлено залежність часу наростання і спадання залежно від довжини хвилі випромінювання.

Шляхом математичної обробки та апроксимації експериментальних кривих фотоструму при наявності і відсутності освітлення, отриманих з літературних джерел, розраховано кінетичні параметри фотовідгуку для зразків меланіну, отриманих різними способами.

Наявність асиметрії на кривих наростання та спаду і залежність часових параметрів від прикладеного електричного поля є класичними ознаками того, що механізм транспорту в досліджуваних плівках меланіну має стрибковий характер і контролюється процесами захоплення та вивільнення носіїв заряду на локалізованих пастках у забороненій зоні. Встановлено, що процеси релаксації фотовідгуку у плівках меланіну характеризуються часами життя неосновних носіїв заряду порядку 1–10 секунд, що вказує на значний вплив глибоких пасток на транспорт носіїв заряду, а також додатково свідчить про змішаний іонно-електронний механізм провідності досліджуваних плівок.

Порівняння характеристик досліджуваних матеріалів показало, що меланін поступається традиційним неорганічним напівпровідникам CdS і CdSe за абсолютною величиною фоточутливості. Водночас його здатність до іонної провідності та біосумісність відкривають унікальні перспективи для створення біоелектронних інтерфейсів та сенсорів вологості, які неможливо реалізувати на базі класичної електроніки.

На завершення вважаю своїм приємним обов'язком виразити щиру подяку старшому науковому співробітнику Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України (Київ) М.О. Семененку за практичну допомогу в підготовці та проведенні вимірювань фотовідгуку органічних напівпровідників.

Список використаних джерел

- [1] A. B. Mostert, ‘Melanin, the What, the Why and the How: An Introductory Review for Materials Scientists Interested in Flexible and Versatile Polymers’, *Polymers*, vol. 13, no. 10, p. 1670, May 2021, doi: 10.3390/polym13101670.
- [2] P. Meredith and T. Sarna, ‘The physical and chemical properties of eumelanin’, *Pigment Cell Res.*, vol. 19, no. 6, pp. 572–594, Dec. 2006, doi: 10.1111/j.1600-0749.2006.00345.x.
- [3] A. B. Mostert *et al.*, ‘Role of semiconductivity and ion transport in the electrical conduction of melanin’, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 109, no. 23, pp. 8943–8947, Jun. 2012, doi: 10.1073/pnas.1119948109.
- [4] M. d’Ischia, A. Napolitano, V. Ball, C.-T. Chen, and M. J. Buehler, ‘Polydopamine and Eumelanin: From Structure–Property Relationships to a Unified Tailoring Strategy’, *Acc. Chem. Res.*, vol. 47, no. 12, pp. 3541–3550, Dec. 2014, doi: 10.1021/ar500273y.
- [5] S. Singh *et al.*, ‘Microbial melanin: Recent advances in biosynthesis, extraction, characterization, and applications’, *Biotechnol. Adv.*, vol. 53, p. 107773, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.biotechadv.2021.107773.
- [6] A. Bernardus Mostert, B. J. Powell, I. R. Gentle, and P. Meredith, ‘On the origin of electrical conductivity in the bio-electronic material melanin’, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, no. 9, p. 093701, Feb. 2012, doi: 10.1063/1.3688491.
- [7] P. Meredith, B. J. Powell, J. Riesz, S. P. Nighswander-Rempel, M. R. Pederson, and E. G. Moore, ‘Towards structure–property–function relationships for eumelanin’, *Soft Matter*, vol. 2, no. 1, pp. 37–44, 2006, doi: 10.1039/B511922G.
- [8] J. McGinness, P. Corry, and P. Proctor, ‘Amorphous Semiconductor Switching in Melanins’, *Science*, vol. 183, no. 4127, pp. 853–855, Mar. 1974, doi: 10.1126/science.183.4127.853.

- [9] T. Ligonzo *et al.*, ‘Electrical and optical properties of natural and synthetic melanin biopolymer’, *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 355, no. 22–23, pp. 1221–1226, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2009.05.014.
- [10] V. Capozzi *et al.*, ‘Optical and photoelectronic properties of melanin’, *Thin Solid Films*, vol. 511–512, pp. 362–366, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.tsf.2005.12.065.
- [11] K. Wang *et al.*, ‘Melanin–Perovskite Composites for Photothermal Conversion’, *Adv. Energy Mater.*, vol. 9, no. 37, p. 1901753, Oct. 2019, doi: 10.1002/aenm.201901753.
- [12] D. Volynskyi, M. Dusheiko, R. Madan, N. Kutuzov, and T. Obukhova, ‘Melanin/porous silicon heterojunctions for solar cells and sensors applications’, in *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine: IEEE, Apr. 2020, pp. 343–346. doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088805.
- [13] T. Wu, B. Wee, and J. Hong, ‘An Ultrasensitive and Fast Moisture Sensor Based on Self-Assembled Dopamine–Melanin Thin Films’, *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 2, no. 15, p. 1500203, Oct. 2015, doi: 10.1002/admi.201500203.
- [14] А. П. Чебаненко, Ю. М. Каракіс, *Фізика напівпровідників. Ч. 3. Процеси захоплення носіїв заряду: навч.-метод. посіб. до спеціального курсу лекцій “ Фізика напівпровідників”*. Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2021.
- [15] B. G. Streetman and S. K. Banerjee, *Solid state electronic devices*, 7. ed., Global ed. in Always learning. Boston Munich: Pearson, 2016.
- [16] П.М. Воловик, *Фізика для університетів*. Ірпінь: Перун, 2005.
- [17] M. Brinza, J. Willekens, M. L. Benkhedir, E. V. Emelianova, and G. J. Adriaenssens, ‘Photoconductivity methods in materials research’, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 16, no. 11–12, pp. 703–713, Nov. 2005, doi: 10.1007/s10854-005-4972-7.

- [18] M. Jastrzebska, K. Stępień, J. Wilczok, M. Porebska-Budny, and T. Wilczok, ‘Semiconductor properties of melanins prepared from catecholamines’, *Gen. Physiol. Biophys.*, vol. 9, pp. 373–83, Sep. 1990.
- [19] Говоров П. П., *Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування»*. Х.: ХНАМГ, 2011.
- [20] Філінюк М. А., Лазарєв О. О., Войцеховська О. В. та ін. : під загальною редакцією М. А. Філінюка, О. О. Лазарєва., *Елементна база електронних апаратів. Частина 5. Оптоелектронні компоненти*. Вінниця : ВНТУ, 2018.
- [21] T Obukhova, M Semenenko, M Dusheiko, S Davidenko, Ye S Davidenko, S S Davidenko, S Malyuta, S Shahan, O S Pylypchuk, P Mochuk, M Voitovych, T Kuzmenko and A Sarikov, ‘Optical studies of melanin films as a material for solar light absorbers’, *Mater. Res. Express*, vol. 12, no. 6, p. 065503, Jun. 2025, doi: 10.1088/2053-1591/ade227.
- [22] ‘SDG1000_ServiceManual_SM02010-E01B.pdf’. Accessed: Nov. 25, 2025. [Online]. Available: https://siglenta.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/10/SDG1000_ServiceManual_SM02010-E01B.pdf
- [23] ‘SDS1000CML+_DL+_UserManual_UM0101A-E01B.pdf’. Accessed: Nov. 25, 2025. [Online]. Available: https://int.siglent.com/u_file/document/SDS1000CML+_DL+_UserManual_UM0101A-E01B.pdf
- [24] ‘OWON - Download Center’. Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: <https://www.owon.com.hk/download/index.asp>
- [25] ‘Цифровий люксметр UNI-T UT381A - Обладнання Uni-T’. Accessed: Nov. 25, 2025. [Online]. Available: <https://uni-t.ua/uk/catalog/illuminance-meter-uni-t-ut381a/>
- [26] ‘UT381A Illuminance Meter - UNI-T Meters | Test & Measurement Tools and Solutions’. Accessed: Nov. 25, 2025. [Online]. Available: <https://meters.uni-trend.com/product/ut381a-illuminance-meter/>

- [27] ‘Origin (data analysis software)’, *Wikipedia*. Sep. 30, 2025. Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Origin_\(data_analysis_software\)&oldid=1314256000](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Origin_(data_analysis_software)&oldid=1314256000)
- [28] ‘Python (programming language)’, *Wikipedia*. Apr. 19, 2026. Accessed: Apr. 20, 2026. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Python_\(programming_language\)&oldid=1349898466](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Python_(programming_language)&oldid=1349898466)
- [29] I. Hanyz and D. Wróbel, ‘Photovoltage generation and fluorescence of charged tetraphenylporphyrins with dopa melanin’, *Cryst. Res. Technol.*, vol. 38, no. 3–5, pp. 325–330, Apr. 2003, doi: 10.1002/crat.200310039.