

ОПТИЧНІ, ОПТОЕЛЕКТРОННІ І РАДІАЦІЙНІ СЕНСОРИ

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC AND RADIATION SENSORS

PACS 07.07.Df, 42.70.Qs

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.339704>

РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ УФ-ФОТОРЕЗИСТИВНОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВІ ТОНКОПЛІВКОВОГО ОКСИДУ ЦИНКУ

I. С. Вірт, <https://orcid.org/0000-0001-7200-6055>

I. В. Падалка, <https://orcid.org/0009-0007-4071-5878>

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,
факультет фізики, математики, економіки та інноваційних технологій,
вул. Івана Франка, 24, м. Дрогобич, 82100, Україна,
e-mail: isvirt@dspu.edu.ua, ivan.padalka@dspu.edu.ua

Анотація. У статті описано фотоелектричні властивості змодельованого формуючого і підсилювального каскадів у фотоприймачі, який виявляє ультрафіолетове випромінювання. Створено модуль, що містить монолітний сенсорний індикаторний пристрій на основі базового фоторезистора з оксиду цинку та трансїмпедансного підсилювача (*transimpedance amplifier (TIA)*). На основі отриманих результатів запропоновано та протестовано простий детектор випромінювання з двокаскадним диференціальним підсилювачем. За напруги зміщення 4 В була отримана чутливість фотомодуля $5 \cdot 10^4$ В/Вт. Порівняно шум каскадів у режимах темного струму та при освітленні стандартним промисловим світлодіодом і проаналізовано смугу пропускання сигналу.

Ключові слова: детекція випромінювання, фоторезистор, УФ-сенсори, трансїмпедансний підсилювач, оксид цинку

Вступ

У даний час одним зі способів реєстрації оптичних сигналів є використання фотоелектричних (ФЕ) елементів. Напівпровідникові фотодетектори випромінювання переважно використовують спеціальну схему формування сигналу, що забезпечує необхідні параметри системи детектування. Монолітна інтеграція ультрафіолетового (УФ) датчика у якості фото-

резистора зменшує займану площу порівняно з гібридною комбінацією дискретних компонентів [1,2]. Виявлення ультрафіолетового (УФ) світла стає дедалі важливішим, оскільки УФ-сенсори знаходять застосування в багатьох галузях [3,4]. Для різних прикладних завдань важливо ретельно контролювати УФ-випромінювання. Фотоприймачі є ключовими елементами в різних методах виявлення випромінювання. Їх використовують у медицині,

науці, промисловості та системах безпеки. УФ-сенсори також корисні для виявлення полум'я, у біомедичній спектроскопії та військових цілях. Пристрої різних конструкцій вимірюють інтенсивність випромінювання, тривалість світлового впливу, кількість частинок та інші параметри. Часто застосовуються твердотільні детектори [5]. Однак, у більшості випадків необхідно правильно формувати сигнал, щоб підготувати його для подальшої обробки цифровою схемою (наприклад, аналого-цифровим перетворювачем або компаратором).

У наш час тактичні сенсорні системи робототехніки стають все більш важливими через вимогу до безпеки зіткнень та реактивного керування в неструктурованих середовищах. На основі показань існують три основні класи датчиків, які можуть вимірювати принцип роботи тактичних сенсорних елементів, а саме оптичні, ємнісні та резистивні ефекти. Резистивні датчики є одними з найпоширеніших через їх відносно невисоку дешевизну у виробництві та легкість інтерфейсу зі схемою формування сигналу. Фотоелектричний модуль працює як замкнута система, використовуючи принцип моста Вітстона разом зі світлозалежним резистором (*LDR*). Оксид цинку – це матеріал, який добре підходить для цього, оскільки має велику ширину забороненої зони оптимальну для абсорбції УФ-випромінювання, високу квантову ефективність та порівняно високу рухливість електронів. На його основі на даний час створено та протестовано значна кількість фотодетекторів (ФД) УФ-випромінювання [6,7].

Проектування та технологія пристрою

У даній статті пропонується застосування диференціального підсилювача *TIA* з низьким рівнем шуму, низькою вартістю, високою чутливістю та простою структурою. *TIA* використовує лише один ОП для диференціального посилення, що ефективно усуває постійне зміщення та зменшує як внутрішній, так і зовнішній шум [8,9]. Ця особливість робить *TIA* надзвичайно придатним для виявлення високочастотних слабких оптичних сигналів. *TIA* здатні перетворювати сигнали вхідного

струму на сигнали вихідної напруги та часто використовуються як схеми передпідсилювачів для фотодіодів (ФД), інерціальної навігації, систем контролю орієнтації та позиціонування, що широко використовуються в аерокосмічній, авіаційній, навігаційній, картографічній та інших інженерних галузях. Перетворювачі струму в напругу *TIA* зазвичай використовують з однопиксельними детекторами видимого та інфрачервоного випромінювання, тоді як підсилювачі заряду зазвичай працюють як схеми зчитування в матрицях детекторів [10-12]. Більшість досліджень *TIA* зосереджені на низьких частотах (до 100 МГц). У системі з закритим циклом для визначення характеристик випромінювання використовується різноманітна активна сенсорика, така як *LDR*. У літературі описано багато систем сучасних пристроїв, призначених для відстеження розташування об'єктів в реальному часі – трекерів. Трекери, наприклад *GPS (Global Positioning System)*, різняться залежно від використовуваних методів відстеження, таких як методи на основі датчиків, на основі геометричних рівнянь, на основі штучного інтелекту, тощо [13-16]. Трекери на основі датчиків є найбільш запропонованими системами завдяки своїй простоті та співвідношенню ефективності/ціна. Вони широко використовують світлові датчики, такі як фоторезистори (*LDR*), фотодіоди, сонячні елементи, пірометри для відстеження руху джерел випромінювання [17]. Найпоширенішими датчиками є *LDR* через їхню просту схему та дуже низьку ціну. З цих причин багато досліджень використовують цей тип датчиків у своїх системах [18].

У цьому дослідженні ми пропонували та протестували застосування монолітного *LDR*-резистора на основі оксиду цинку. Тонкі плівки оксиду цинку були отримані методом імпульсного лазерного осадження (*Pulsed Laser Deposition (PLD)*) за підібраними технологічними умовами лазерної абляції відповідних мішеней. Спресовані мішені оксиду цинку, леговані нікелем (*Ni 0,1%*), випаровували за допомогою *Nd:YAG* лазера на комерційні підкладки Al_2O_3 (орієнтація підкладки

у с-площині), нагріті до 250 °С. Параметри лазера: довжина хвилі $\lambda \approx 1064$ нм; енергія в імпульсі $E_{max} \approx 0,4$ Дж; тривалість імпульсу $\delta t \approx 20$ нс, частота повторення імпульсів $f \approx 3$ Гц. Використовували дози росту (від 1000 до 1500 імпульсів). Отримано плівки з мозаїчною монокристалічною структурою товщиною близько 300 нм. Свіжовирощені плівки відпалювали при температурі 300 °С протягом 20 хвилин в атмосфері кисню. Струмоведучі контакти виготовлено з допомогою срібної пасти. Розміри світочутливої ділянки тонкої плівки 1×1 мм². Структура пристрою LDR-резистора проілюстрована на рис. 1.

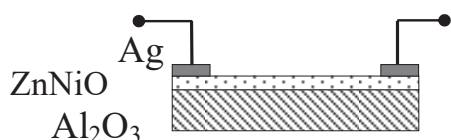


Рис. 1. Схема резистора LDR на основі тонкоплівкового оксиду цинку на підкладці Al_2O_3 .

У системі відстеження оптичного сигналу може бути застосована конструкція сканування *Dynamic Application Security Testing (DAST)*, що забезпечується схемою моста Вітстона (*Wheatstone bridge (VMWB)*) [19] використаного у даному дослідженні включаючи як функціональний елемент LDR. Даний підхід, заснований на сигналах струму, придатний для виявлення дуже малих коливань резистивних датчиків у конфігурації моста Вітстона. Використовуючи схему моста, вихід чутливої параметричної функції отримується від датчика електричного опору LDR – рис. 2. Це використовується для порівняння сигналу з деяким заданим значенням. LDR працює під зовнішнім зміщенням 10 В.

На основі фотодетектора LDR розроблений каскадний модуль індикатора датчика на операційних підсилювачах (ОП) LT118A який доповнено іншим типом операційного підсилювача – компаратором LT1716, що використовується для точного порівняння двох напруг.

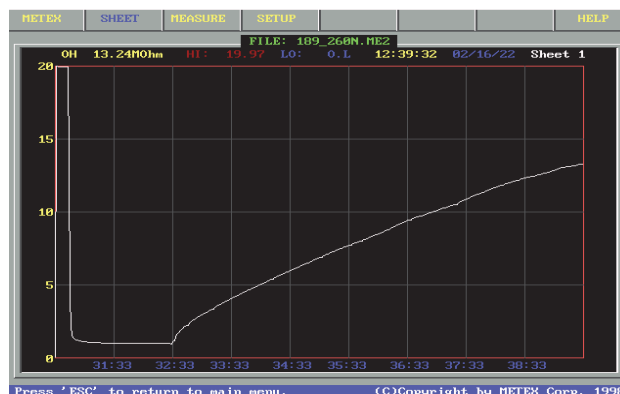


Рис. 2. Осцилограма зміни електричного опору резистора LDR при освітленні випромінюванням з довжиною хвилі 365 нм потоком 0,5 мВ/см² (масштаби: по вертикалі- 1МОм, по горизонталі -60 с).

ОП-компаратор має три основні якості: (1) -високий вхідний опір: струм практично не надходить на входи; (2) -низький вихідний опір: вихід може працювати зі значним струмом; (3) – високий коефіцієнт посилення. Компаратор, як правило, використовується для визначення того, який із двох входів має вищу напругу [20,21]. LDR-сенсор має змінний електричний опір залежно від інтенсивності світла, і його опір зменшується зі збільшенням інтенсивності світла. Якщо виникає дисбаланс напруг, що генеруються в гілках моста Вітстона датчиком LDR, створюється різниця напруг через різницю резистивності. Напруга, що генерується на виході моста Вітстона, передається на операційні підсилювачі де посилюється. Вихідна напруга операційних підсилювачів схемою керування активує компаратор. Фоторезистор (LDR-сенсор) із оксиду цинку є надійним (не піддається деградації) і простим (підкоряється закону Ома) компонентом, опір якого зменшується при створенні носіїв заряду фотонами у його об'ємі [22]. Правда, фоторезистори менш чутливі, ніж інші подібні елементи, фотодіод і фототранзистор [23], але простіші у використанні. При заданому рівні освітлення фоторезистор працює так само, як звичайний лінійний резистор, і, таким чином, поводить себе однаково для струму незалежно від його напрямку.

Конструкція модуля та результати моделювання

2.1. Принципова електрична схема фотомодуля

Розроблене електричне коло являє собою систему із замкнутим контуром сенсорного індикаторного модуля, в ОП якої вихід чутливої параметричної функції отримується датчиком опору *LDR* з використанням схеми моста Вітстона. Сенсорний індикаторний модуль виявляє ультрафіолетове світло через *LDR*-резистор. *LDR*-резистор перетворює сигнали фотоструму на сигнали напруги через зовнішній каскад двох трансїмпедансних підсилювачів [24-26]. Трансїмпедансний підсилювач складено з типових операційних підсилювачів LT118A, під'єднаних у конфігурації інвертуючого підсилювача з негативним зворотним зв'язком. Принципова схема даного УФ-модуля, показана на рис. 3.

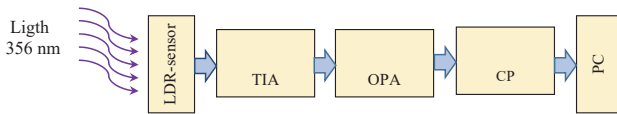


Рис. 3. Принципова електрична схема УФ-фотомодуля: *LDR-sensor* – фоторезистор оксиду цинку; *TIA* – трансїмпедансний підсилювач, *OPA* – операційний підсилювач; *CP* – компаратор; *PC* – табло реєстратора.

У даній конфігурації коефіцієнт посилення струму до напруги оцінюється опором зворотного зв'язку R_7 на низьких частотах. Цей метод використовується для забезпечення сигналу на виході датчиків опору, таких як світлозалежні датчики опору та фоторезистори тощо. Опір R_x лінійного датчика опору може бути наступним:

$$R_x = R_0(1 \pm kx), \quad (1)$$

де k – константа перетворення датчика, параметр x залежить від вимірюваної величини, а R_0 – номінальний опір сенсорного елемента ($x = 0$). Коли опір в інших частинах мосту дорівнює R_0 , вихідний сигнал мосту V_{outBr} дорівнює:

$$V_{outBr} = \varepsilon \cdot \frac{kx}{k_{Br}(1 + kx/2)}. \quad (2)$$

У рівнянні (2): ε – напруга джерела живлення мосту, а k_{Br} – константа мосту (повний міст $k_{Br}=4$, півміст $k_{Br}=2$). Рівняння (2) показує, що взагалі вихідна напруга мосту V_{outBr} буде нелінійною функцією. Оскільки відсоток зміни опору елемента досить високий ($k \cdot x \gg 1$), нелінійність є низька. Нелінійністю відносно робочого діапазону можна знехтувати, це забезпечує перевагу вимірювання на основі мосту. Через низький коефіцієнт послаблення живлення *PSRR* (*Power Supply Rejection Ratio*) дільника напруги, міст Вітстона використовується для взаємодії з датчиком *LDR*. Ця конструкція перспективна для розробки інтегрованої схеми зчитування *ROIC* (*Readout Integrated Circuit*) для резистивного детектування [27].

2.2. Методологія та архітектура конструкції

Конструкція модуля використовується для перетворення значення зміни опору датчика у значення напруги. У цій конфігурації V_{inpl} – напруга збудження, R_p , R_5 та R_8 – значення фіксованих резисторів мосту, а *LDR* елемент змінного мосту створює зміну вихідної напруги. Перший каскад підсилення – це диференціальні підсилювачі, які перетворюють вхідну напругу на струм з попереднім підсиленням. Другий каскад виконує дію оцифрування сигналу. Проектування обох каскадів складається з визначення специфікацій та умов зміщення. Функціональність операційного підсилювача, частотна характеристика розімкнутого контуру, напруга зміщення та діапазон напруг на вході *ICMR*, (*Input Common-Mode Range*) були проаналізовані на основі бажаних характеристик. Параметри кожного були розраховані на основі специфікацій операційних підсилювачів, таких як коефіцієнт посилення в розімкнутому контурі, струм, амплітуда вихідної напруги.

Схема модуля з підсилювачами напруги є типовою для фотосенсорів [28,29]. Залежно від типу детектора та його конкретних застосувань, фоторезистор є зміщений від джерела V_b . УФ-датчики у якості *LDR*, як правило, ємнісні. Дана ємність безпосередньо впливає на стабільність системи. Конденсатор зворотного

зв'язку C_f ввімкнуто паралельно до трансімпедансного резистора зворотнього зв'язку.

Для цілей моделювання у якості датчика *LDR* використано змінний ідеальний резистор опір якого змінювали від максимального значення 1 МОм до номінального значення резистивного датчика, яке становить 1 кОм. Це номінальне значення базується на реакції *LDR* від освітлення ультрафіолетовим світлом. Схема складена таким чином, щоб підвищити чутливість звичайної мостової схеми при вимірюванні поступової зміни опору резистивного датчика. Технічні характеристики даного УФ-модуля, зокрема вхідний та вихідний сигнали при освітленні густиною потужності 50 мкВ/см², показано на рис. 4. Зокрема, робочий діапазон УФ-модуля знаходиться на достатньо низькій частоті. Смуга пропускання схеми УФ-модуля в цій конструкції становила приблизно 1 кГц, що значно більше, ніж робоча частота струму – приблизно 1 Гц. Швидкість реакції *LDR*-резистора (як і типових фоторезисторів ультрафіолетового діапазону) становить порядку секунд [30]. Компаратор кінцевого каскаду (ОП LT1716) задає значення, який із двох входів дає вищу напругу. Значення компаратора було налаштовано таким чином, щоб керуючий сигнал вмикався після перевищення заданої інтенсивності ультрафіолетового світла.

Моделювання характеристик контуру двокаскадного підсилення

3.1. Використання моделювання LTSpice для УФ-модуля

Технології схем електронної промисловості часто використовують моделювання *LTSpice* для симуляції електронних кіл [31]. Використання диференціальних операційних підсилювачів у *LTSpice* відоме своєю високою точністю моделювання, простотою використання та значною розширюваністю. З оновленнями програмного забезпечення пакет *LTSpice* також пропонує такі функції, як аналіз перехідних процесів, аналіз змінного струму, аналіз шуму та *FFT*-аналіз. *LTSpice* інтегрує деякі *SPICE*-моделі схем диференціальних операційних

підсилювачів, що дозволяє безпосередньо використовувати їх для побудови схем та проведення схематичного моделювання, що робить його дуже придатним для моделювання цього типу пристроїв. Коефіцієнт зворотного зв'язку визначається співвідношенням опорів на двох гілках електричного кола. Практична схема була побудована таким чином, щоб мінімізувати вплив паразитних ємностей, які можуть суттєво впливати на вихідний шум. Програмне забезпечення *LTSpice* підтримує різноманітні типи вхідних сигналів, включаючи імпульсні сигнали, синусоїдальні сигнали, форми сигналів експоненціальної функції. *LTSpice* інтегрує різні функції аналізу моделювання, включаючи перехідні процеси, аналіз змінного струму, аналіз постійного струму та аналіз рівня шуму.

Побудована схема показана на рис. 4а, інтерфейс конфігурації параметрів моделювання показано на рис. 4б,с. На рис. 4а показано тестову схему для визначення напруги зміщення та розмаху вихідної напруги. На рис. 4б зображено фотосигнали вхідної напруги фотомодуля, пов'язані з оптичним імпульсним випромінюванням 1 Гц на довжині випромінювання 365 нм. Вертикальна вісь – це падіння напруги на змодельованому вході та виході схеми. Для отримання лінійних характеристик, подібних до характеристик оптопари, використовувано почергові кроки. Вузол V_{inpl} на вхідній стороні переміщується на вузли V_{ampf} , і в кінцевому на вузол V_{out} . Модель, представлена на рис. 4, використовується також для демонстрації базової роботи оптопари джерело освітлення – фотомодуль. На рис. 4с показано результат моделювання частотної характеристики розімкнутого контуру для двокаскадного підсилення. Коефіцієнт підсилення, отриманий з графіка першого каскаду, становить приблизно 35 дБ. З графіка двокаскадного підсилювача отриманий коефіцієнт підсилення розімкнутого контуру становить близько 75 дБ.

На основі моделювання на рис. 4с видно, що амплітуда вихідної напруги – від 0 В до 2,4 В. Номінал резистора *LDR* для моделювання калібрували з експериментальних даних для сенсора оксиду цинку (осцилограма рис. 2).

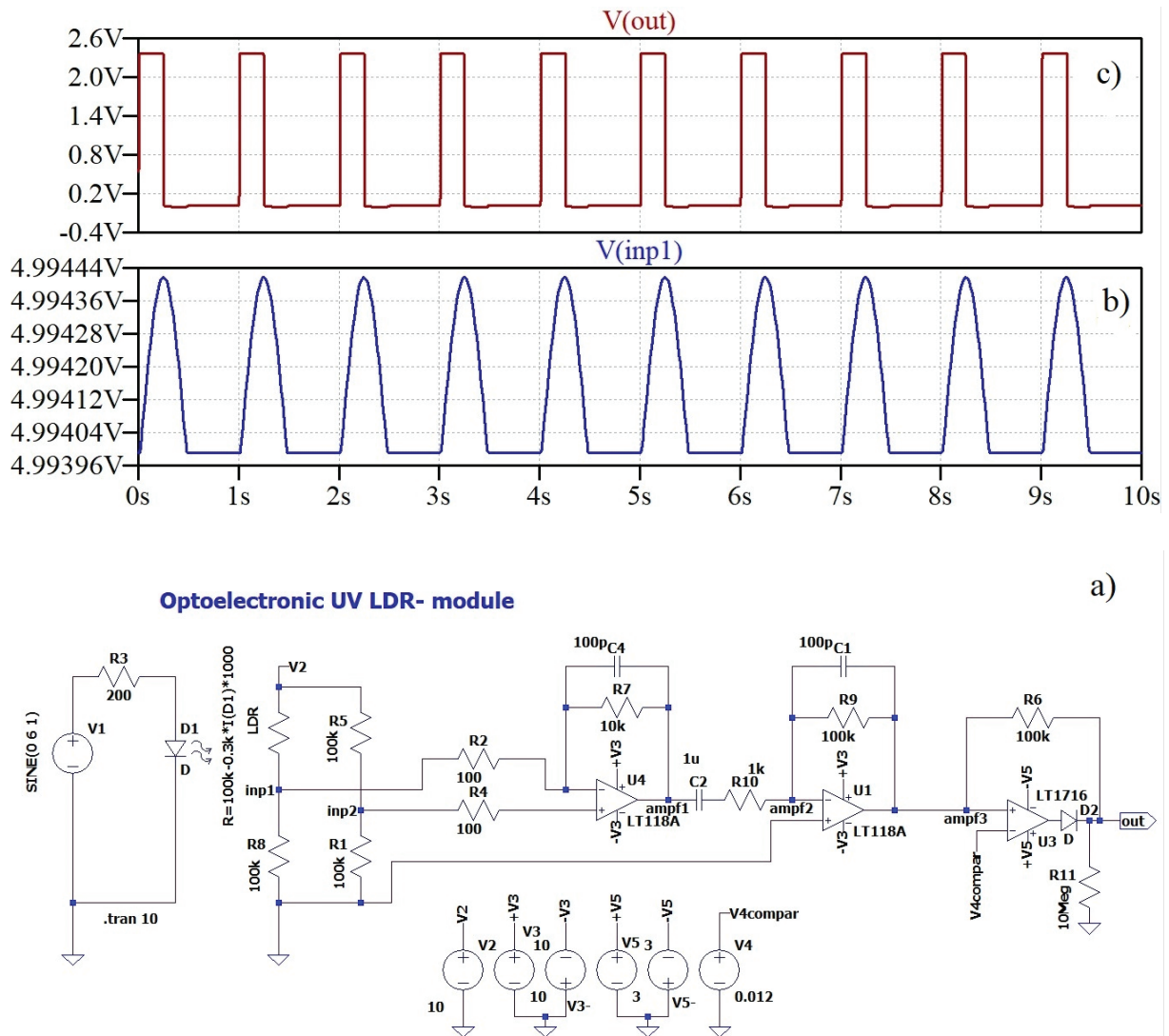


Рис. 4. Схема фоторезисторного модуля на основі тонкоплівкового оксиду цинку при симуляції освітленням LED – а); вхідний – б); вихідний – в) сигнали.

У припущенні, що заданий рівень інтенсивності УФ-випромінювання становить 50 мкВт/см^2 (10% від номінальної), то пов'язаний фотострум практично перетворюється на вихідну напругу (V_{out}), більшу за напругу ввімкнення компаратора. Більший коефіцієнт підсилення збільшує чутливість схеми. Коефіцієнт підсилення операційного підсилювача можна збільшити залежно від навантаження. Однак це впливає на стабільність роботи операційного підсилювача, і стабільного підсилення при цьому досягти проблематично. На основі цього моделювання створено файли «.asc».

3.2. Результати моделювання підсилювального каскаду

Для перевірки ефективності проекту та тестування продуктивності схеми, електричне коло керування фотомодуля піддається аналізу перехідних процесів, аналізу змінного струму та аналізу рівня вихідного шуму за допомогою *LTspice*. На складеній схемі виконано одночасно: аналіз перехідних процесів, аналіз змінного струму, аналіз постійного струму, поведінку шумів та варіацію властивостей фоторезистора. Величина трансімпедансного перетворення встановлюється значенням опору зворотного зв'язку (R_f). У всіх випадках

фоторезистор під'єднується до інвертуючого входу (in^-). Це впливає на полярність вихідного сигналу. Застосовано симетричне подвійне живлення операційного підсилювача. Малошумна опорна напруга з еталонних резисторів моста подана до неінвертуючого вузла (in^+). У разі забезпечення зміщення за допомогою неінвертуючого входу максимальна напруга, що виробляється на вхідних резисторах, залежить від умов живлення операційного підсилювача та співвідношення між величинами резистора R_{LDR} та опору зворотнього зв'язку. Динамічний діапазон виходу може бути обмежений у деяких випадках через відносно високу постійну складову на вихідному вузлі операційного підсилювача. Відповідна напруга зміщення на входах дорівнюватиме V_b , коли $R_{LDR} \gg R_p$, а операційний підсилювач працює

в динамічному діапазоні. Для роботи з короткими імпульсними сигналами слід враховувати обмеження смуги пропускання та відповідну компенсацію робочої частоти підсилювача, щоб не порушувати форму сигналу падаючого випромінювання (амплітуда, нахили). Фільтр високих частот у конфігурації напруги також може впливати на реєстрований сигнал, особливо на низьких частотах.

Аналіз перехідних процесів – Transient Analysis(.tran). Збір даних перехідних процесів встановлено на тривалість 10 секунд з початковою точкою зберігання 0 секунд та мінімальним кроком відображення 0,1 секунд. Оскільки джерело сигналу (рис. 5а) налаштовано як синусоїдальний сигнал частоти 1 Гц, період становить 1 секунда, що дозволяє відображати рівно 10 циклів. Таким чином, цей набір пара-

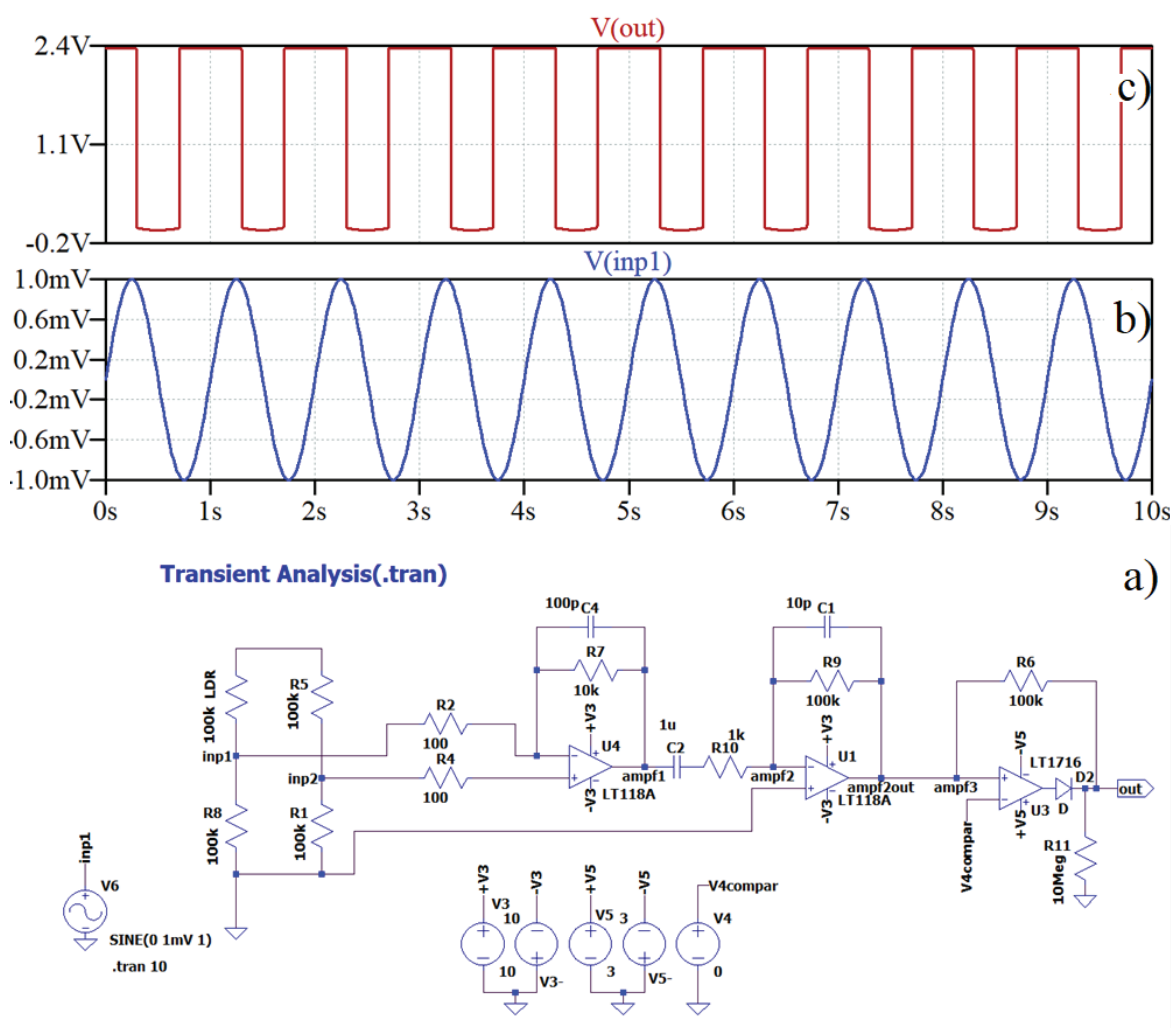


Рис. 5. Схема каскаду УФ-фотомодуля при симуляції перехідних процесів – а); вхідний – б); та вихідний – в) сигнали.

метрів моделювання повністю здатний імітувати вихід схеми фотомодуля під дією джерела сигналу частоти 1 Гц. Результати моделювання показано на рис. 5b,c. З залежностей (рис. 5b) видно, що вхід має постійне зміщення 0 В з амплітудою, яка коливається на 1 мВ відносно рівня 0 В. З рис. 5с видно, що вихід має постійне зміщення 0 В з прямокутною амплітудою, яка коливається на 2,4 В вище нуля. Результат диференціального виходу має амплітуду, що дорівнює $A_v H = 75$ дБ вхідного сигналу з вихідною синфазною напругою 2,4 В, що підтверджує ефективність схеми.

Передавальна функція постійного струму – Sweep Analysis(.dc): Передавальна функція постійного струму дає залежності підсилення струму (або напруги) у вибраних

діапазонах значень. Для схем з високим коефіцієнтом посилення потрібно визначити це значення з точністю до багатьох розрядів. На рис. 6а показано тестову схему *LTspice* для передавальної функції постійного струму з використанням стандартних номіналів резисторів. Аналіз передавальної функції *SPICE* розраховує коефіцієнт підсилення на низьких частотах та вхідний і вихідний опори кола. Для виконання аналізу передавальної функції постійного струму вказано джерело (у цьому випадку V_i) та вихід схеми (V_{out}). Щоб симулювати схему є розгортка постійного струму, для визначення значення зміщення V_i для $V_0 = 1,0$ мВ. Результати тесту показано на рис. 6b,c. Якщо схема зміщена таким чином, що $V_0 = V_{CC}/2 = 5$ В, ми отримуємо $V_{out} = 2,38$ В.

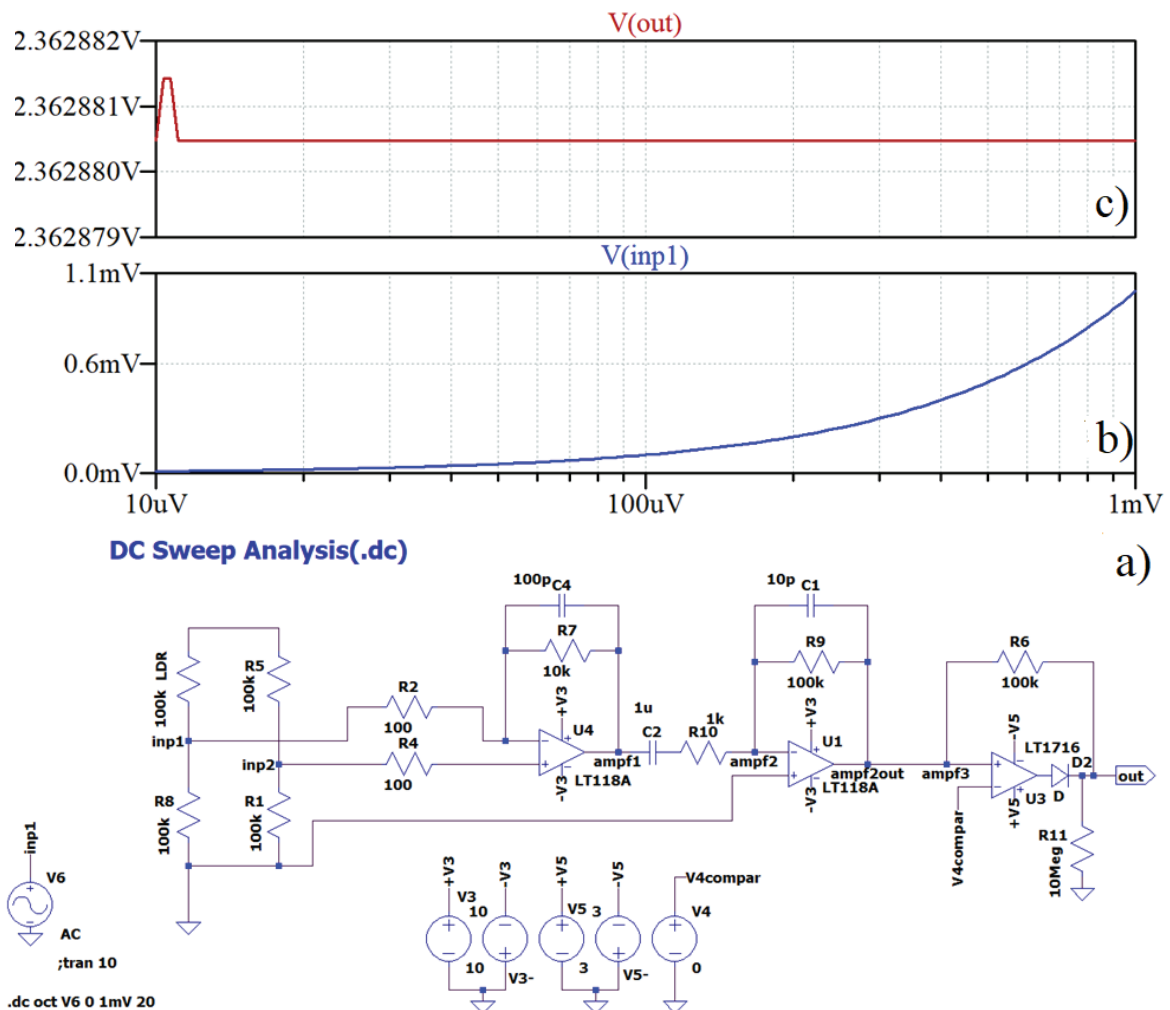


Рис. 6. Схема каскаду УФ-фотомодуля при симуляції перехідних процесів DC – а); розгортка вхідного – б); та вихідного – с) сигналів.

Аналіз змінного струму – LTspice-AC Analysis(.ac). Аналіз змінного струму стосується аналізу частотної характеристики схеми. LTspice пропонує чотири типи частот розгортки для аналізу змінного струму: декадна розгортка, октавна розгортка, лінійна розгортка та фіксовані частотні точки, що дуже зручно для аналізу схем у частотній області. На рис. 7а показано тестову схему LTspice для передавальної функції змінного струму з використанням стандартних значень компонентів. Для дослідження встановлено тип декадної розгортки зі 100 точками сканування на декаду, починаючи з частоти 10 мГц і закінчуючи 1 кГц. Результати тесту показано на рис. 7б,с. Змодельована передавальна функція змінного струму (виміряна при 1 дБ від коефіцієнта підсилення на

низькій частоті) становить 1,0 кГц, що входить у розрахункову цільову смугу пропускання 1 кГц. На залежностях коричнева лінія – результат моделювання аналізу змінного струму виходу фотомодуля. Коефіцієнт підсилення на низьких частотах 10 Гц становить 20 дБ. У режимі високого підсилення система підсилює $A_v H = 40$ дБ, тоді як смуга пропускання досягає $BWH = 1$ кГц. Таким чином, баланс підсилення та смуги пропускання може бути встановлений відповідно до застосування.

Параметричний аналіз – LTspice-Parametric Analysis(.step). Параметричний аналіз дозволяє виконувати інший тип аналізу з використанням діапазону значень компонентів (наприклад: робоча точка постійного струму, перехідні процеси, коливання). Даний аналіз

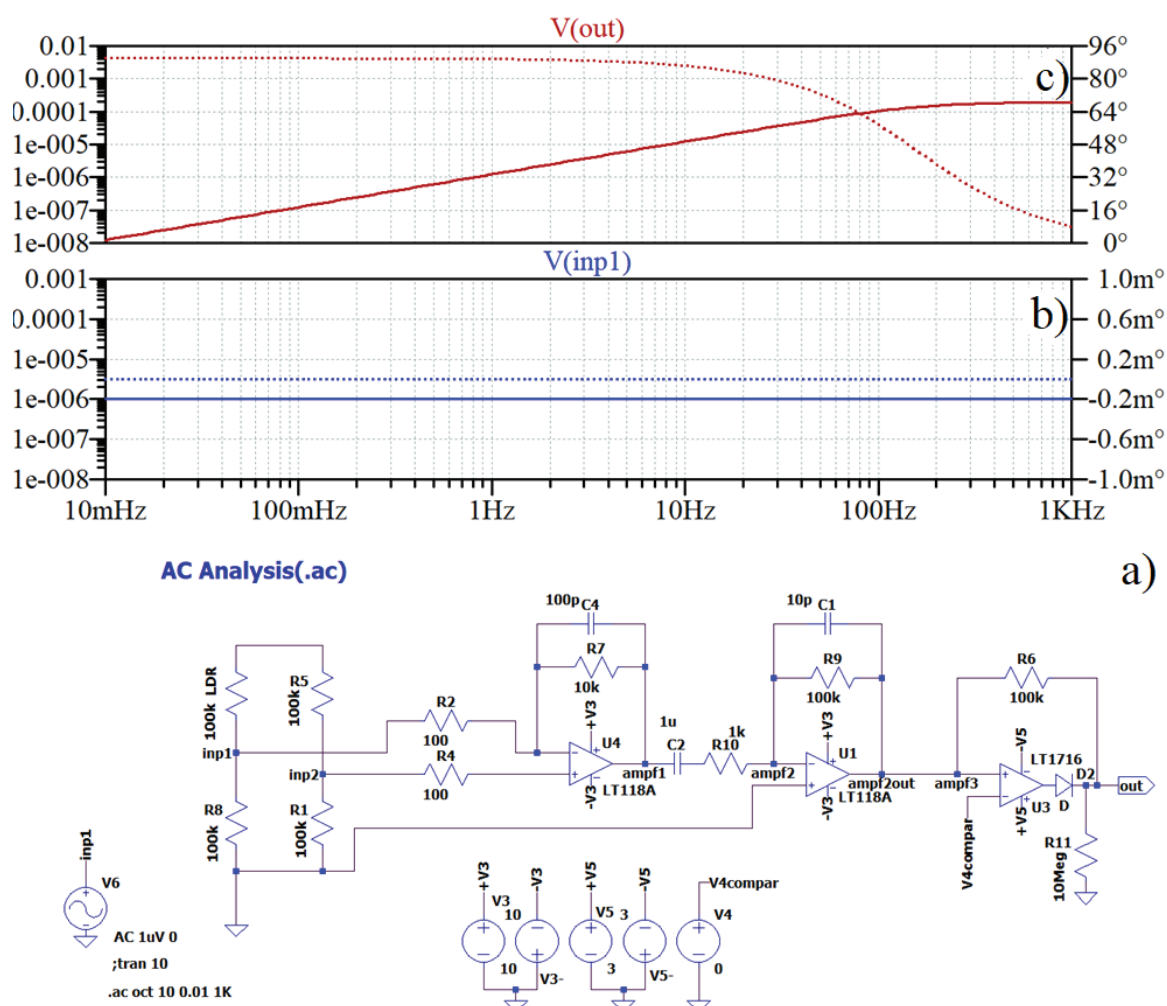


Рис. 7. Схема каскаду УФ-фотомодуля при симуляції змінного струму AC – а); частотна характеристика амплітуди вхідного – б); та вихідного – с) сигналів, (Штрихові лінії – відповідно величини їх фаз).

підходить для елементів електричного кола: резисторів, та будь-яких інших стандартних деталей (конденсаторів, індукторів). У досліджувальному колі використано аналіз при зміні характеристик фоторезистора *LDR* (рис. 8). Змінні параметри введено через налаштування «властивості резистора»— $\{R\}$ замість значення компонента (*step param R*). Варіація виконана у діапазоні 0,1 кОм до 100 кОм з кроком 10 кОм. При виконанні аналізу, а саме графічного, наприклад, аналізу підсилення гармонічного сигналу отримано графіки із серією ліній для кожного значення параметра дискретної форми. Залежності вказують розмиття сигналу при проміжному підсиленні (20%), та незначне розмиття дискретного сигналу (4%) на виході УФ-модуля. З цього випливає, що застосування

тонкоплівкового оксиду цинку у якості фоторезистора *LDR* може бути використане у досить широких межах.

Аналіз Монте-Карло – Monte Carlo Analysis(mc). Процедура Монте-Карло аналізує вплив помилок, спричинених деталями електронної схеми. Важливо виконувати аналіз Монте-Карло під час процесу проектування, оскільки не всі елементи, що використовуються, є такими ідеальними, як при симуляції схеми. Аналіз Монте – Карло виконаний одночасно з аналізом перехідних процесів, аналізом змінного струму, аналізом постійного струму тощо. Функція *mc(...)* пов'язана з генератором випадкових чисел з рівномірним розподілом між заданими межами. Для моделювання застосовано фіктивний ітератор. Ви-

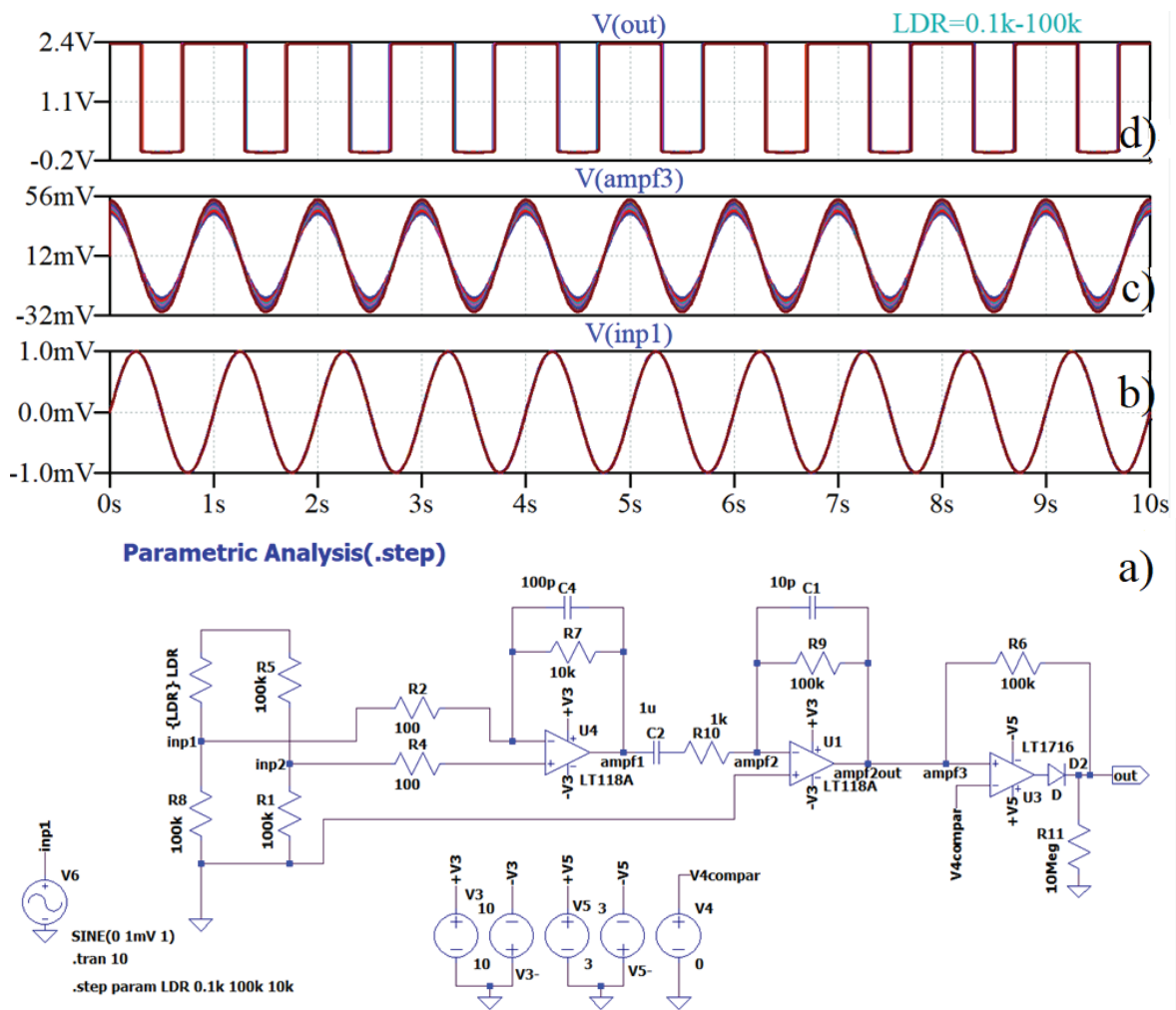


Рис. 8. Схема каскаду УФ-фотомодуля при симуляції параметричного аналізу фоторезистора *LDR* – а); вхідний – б); та вихідні – с), d) сигнали.

конання параметрів керовано функцією *.step param*. У схемі, на кожній ітерації, резистор має випадкове значення в межах встановленого діапазону, й з мінімально можливим та максимально можливим значеннями, тобто в діапазоні $[R(1-tolb), R(1+tolb)]$. У цьому аналізі активне навантаження на вході УФ-модуля змінюється навколо номінального значення з певними величинами. Як показано на рис. 9, було згенеровано та проаналізовано 10 випадкових значень вибірки з гаусовим розподілом $\pm 5\%$. Для виконання аналізу Монте-Карло введено випадкову функцію $\{mc(50k, 0.5)\}$ для значення опору 50 кОм і з похибкою 50%. Тобто значення фоторезистора LDR у режимі освітлення випадково змінювалися у діапазоні $25 \div 75$ кОм. Вихідний дискретний сигнал

УФ-модуля зазнавав незначного $\Delta V/V < 1\%$ розмиття.

Аналіз шуму – LTspice-Noise Analysis(.noise). Враховуючи шум у конкретних електричних схемах, необхідно надати деяку інформацію про існуючі джерела. У таких пристроях, зокрема на резисторах моста є еквівалентні джерела шуму входної напруги (V_n) та еквівалентні джерела шуму входного струму на обох входах (in^- та in^+). Вплив цих джерел може залежати від номіналів резисторів, що існують у колі, включаючи опір або імпеданс джерела сигналу (фоторезистора). Крім того, кожен резистор також є джерелом теплового шуму ($4kTR$). Трансїмпедансні підсилювачі можуть мати ширшу смугу пропускання з шумовими характеристиками, нижчими або

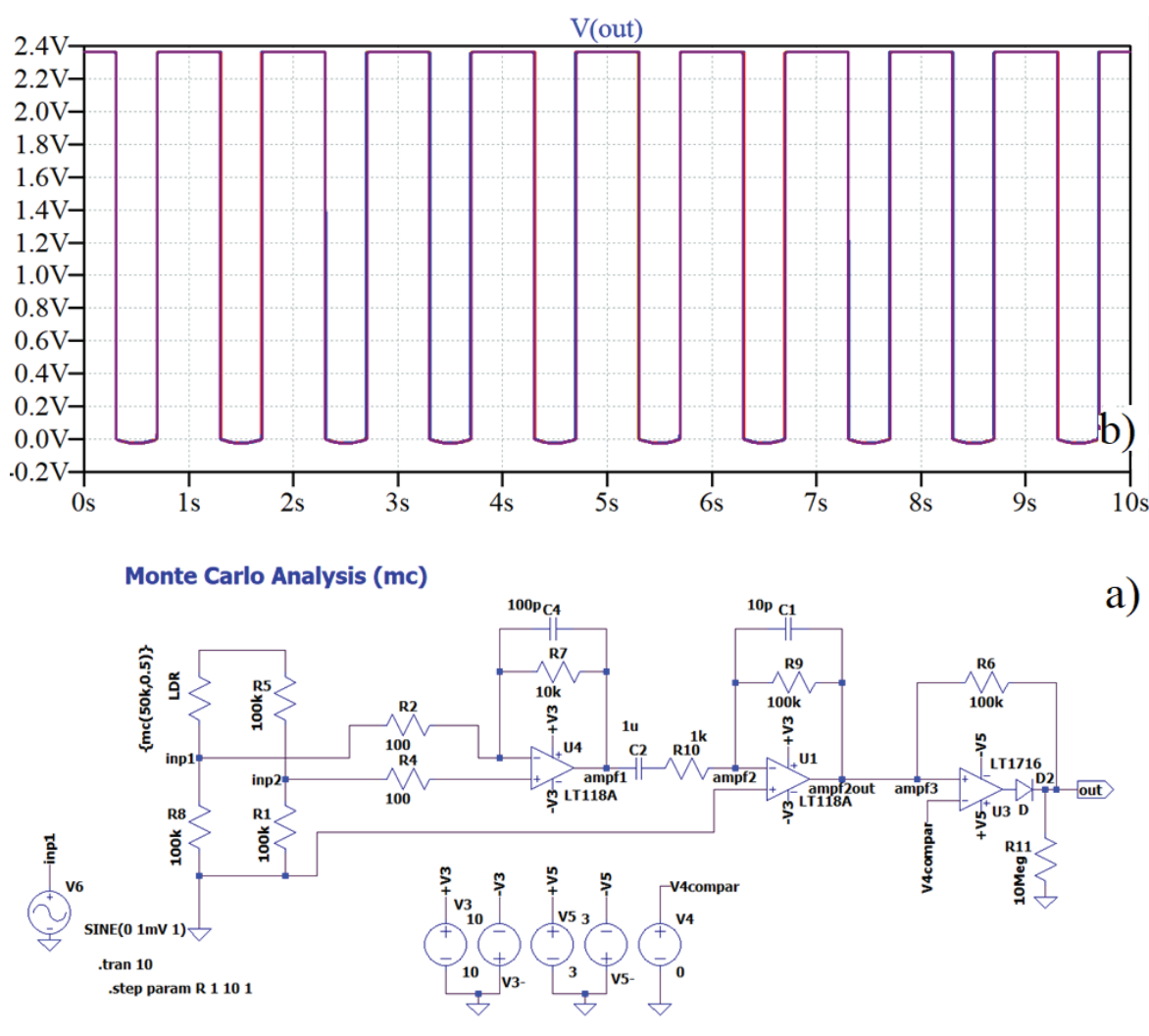


Рис. 9. Схема фоторезисторного УФ-модуля при аналізі Монте-Карло параметра фоторезистора LDR – а); вихідний сигнал – б).

порівнянними з підсилювачами напруги з високим входним імпедансом. На рис. 10а представлено схему аналізу еквівалентного шуму УФ-модуля.

Спектральні характеристики вольтового шуму характеризували у діапазоні частот $10^{-2} \div 10^3$ Гц. Величина густини шумової потужності S_U на виході УФ-модуля має мінімум

$S_U = 1,0 \cdot 10^{-14} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$ на частоті 0,1 Гц і майже не залежить від освітлення. На робочій частоті УФ-модуля 1 Гц величина S_U дещо зростає $S_U = 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$, що спричинене напевно особливостями схеми. Слід зазначити, що теоретичний рівень теплового шуму $4kTR$ для резистора номіналом $R = 100 \text{ кОм}$ при кімнатній температурі знаходиться біля значення $S_U = 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ В}^2 \cdot \text{с}$.

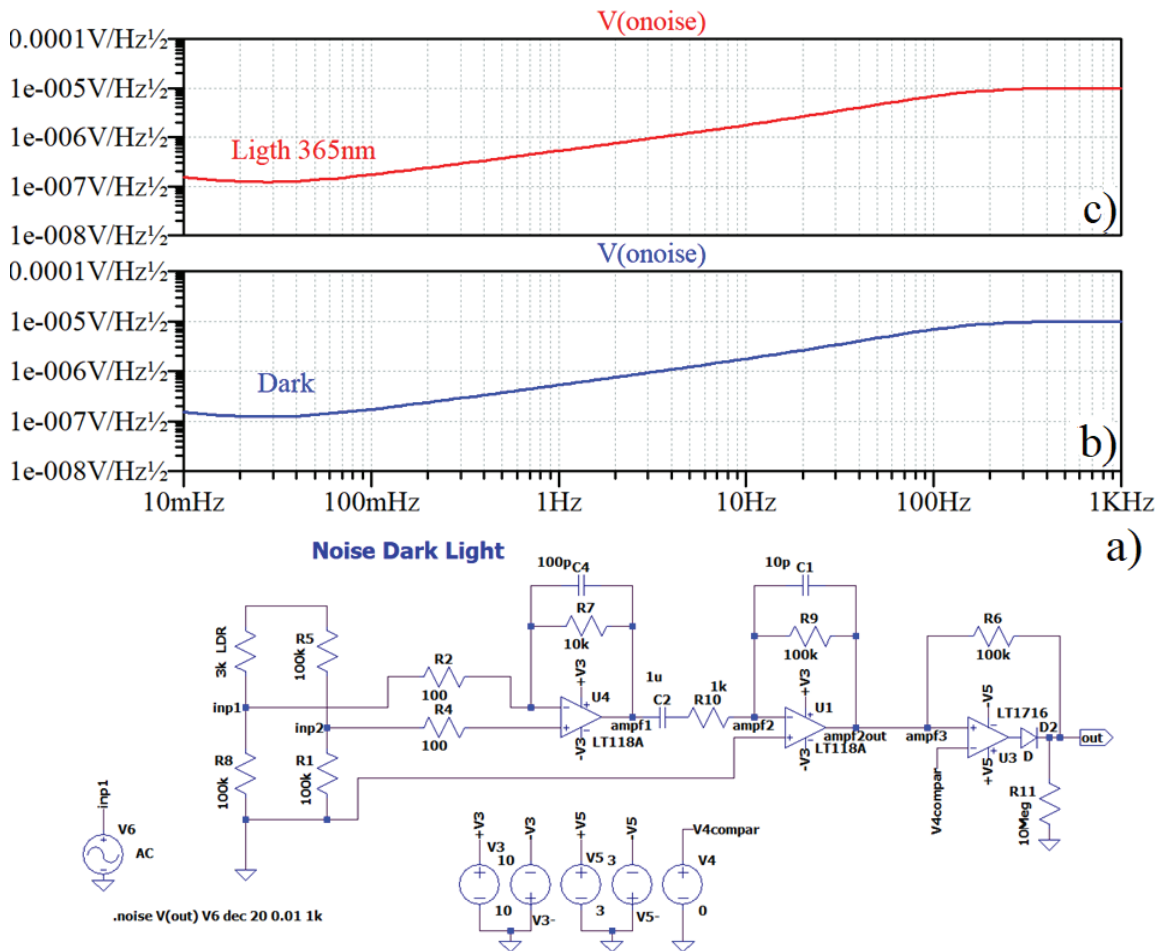


Рис. 10. Схема УФ-модуля при аналізі шумових характеристик – а); спектр темного шуму – б); спектр шуму при освітленні фоторезистора LDR – с).

3.3. Аналіз результатів моделювання УФ-модуля

У представленій схемі можна досягти задовільної лінійності параметрів для змін потужності падаючого випромінювання в діапазоні від мкВт до кількох мВт. Лінійність обмежена в нижній частині значенням параметра NEP якій характеризує фотодетектори, а у верхній – опором навантаження та напругою

живлення. Дані є результатами моделювання для звичайної схеми з повним мостом. Показано, що вищий коефіцієнт підсилення операційного підсилювача збільшує чутливість схеми для створення значної вихідної напруги сигналу. Для отримання достатнього коефіцієнта підсилення, необхідно використовувати резистори зворотнього зв'язку бажано високого номіналу R_f . Поряд зі збільшенням входного

опору каскаду, його тепловий струмовий шум зменшується. Параметри електричної схеми фотомодуля проведені за допомогою розрахунків на основі *Spice* співпадають між окремими алгоритмами моделювання. З результатів моделювання (V_{out} від характеристик тонкоплівкового фотодетектора) визначено чутливість схеми. Використовуючи даний симулятор, отримано $5,5 \cdot 10^{-7}$ В/√Гц і $6,5 \cdot 10^{-7}$ В/√Гц для коефіцієнта каскадного підсилення (перетворення) сигналу величин: 0 (у темноті) і $5 \cdot 10^4$ В/А (при освітленні УФ) відповідно. Часова роздільна здатність залежить від рівня шуму вихідного сигналу передпідсилювача, який головним чином залежить від базової лінії передпідсилювача та шуму послідовних каскадів.

Відношення сигнал/шум *Signal-to-Noise Ratio (SNR)* для частотної смуги 1 кГц (оцінюючи з часових та частотних характеристик на рис. 4 і рис. 10) при освітленні ультрафіолетом 365 нм становить приблизно 92 dB. Фоточутливість фоторезистивної структури визначається величиною фотоструму у мостовій схемі сенсора і досягає на вході підсилювальних каскадів 10^4 А/Вт. Фотострум витоку моста у підсилювальних каскадах трансформується у сигнал напруги і на виході фотомодуля досягає фоточутливості $5 \cdot 10^4$ В/Вт. Ці результати показують, що спроектований УФ-фотомодуль з цифровим виходом має досить високу чутливість та оптимальну здатність детектувати ультрафіолетове випромінювання.

Висновки

Проведено детальний інформаційний огляд щодо топологій *TIA*, розроблених для застосувань *LiDAR*, і відповідно було розроблено топологію фотомодуля *INV-TIA* шляхом випробування. Топологія *TIA* досягає покращеного балансу коефіцієнта посилення та смуги пропускання, покращуючи продуктивність фотоприймального пристрою. Розроблено та протестовано модуль УФ-датчика на основі оксиду цинку, що складається з інтегрованого *LDR*-резистора. Для детектування УФ-випромінювання сигнали фотоструму від УФ-світла були перетворені на сигнали напруги.

Інтегрована схема зчитування була розроблена з використанням моста Вітстона при застосуванні технології плівкового метал-оксидного фоторезистора. Крім того, було запропоновано двохступеневий каскад на основі диференціального *TIA* та основного операційного підсилювача для роботи детектора випромінювання. Вихідну потужність сигналу можна збільшити, використовуючи кілька каскадів. Дана схема продемонструвала хорошу продуктивність, особливо з точки зору споживання енергії та шуму. Під час проектування та тестування використовувалися інструменти моделювання *SPICE*. Отримані результати показують, що чутливість запропонованої схеми покращується від варіації темного опору фоторезистора. Це пов'язано з модифікацією мосту Вітстона шляхом використання підбору компонент. Покращення чутливості дозволяє інтегрувати будь-які резистивні датчики для отримання значної імпульсної вихідної напруги.

Чутливість в УФ-діапазоні була покращена завдяки:

- використанню тонкого шару плівки оксиду цинку,
- використанню та узгодженню кількох каскадів підсилення,
- балансуванню співвідношення резисторів у окремому каскаді для зниження шуму.

При освітленні довжиною хвилі 365 нм, відповідно за напруги зміщення 5 В, була отримана чутливість фотомодуля $5 \cdot 10^4$ В/Вт. Запропонована топологія має значну перевагу з максимальним коефіцієнтом посилення та смугою пропускання для детекторів ультрафіолетового діапазону; ці параметри досягають 92 dB та 1 кГц відповідно, при споживанні енергії 250 мкВт.

Розроблений пристрій може бути цінним для виробників *LDR*-резисторів на ультрафіолетову область спектру. Отримані результати можуть бути використані для вибору правильного підходу до проектування схем фотомодулів для конкретних застосувань та вимог детектування. На основі даного дослідження можна випробувати нові методи та за потреби покращити продуктивність фоторезистивних детекторів.

Список використаної літератури

- [1] X. Tang, X. Liu, C. Zhao, K. Niu, Z. Li, H. Li, B. Li, J. Wang High-temperature ultraviolet photodetector and amplifying integrated circuits based on AlGaN/GaN heterostructure// Journal of Physics D: Applied Physics, 58(8), p.1-6 (2025).
- [2] Y. Zou, Y. Zhang, Y. Hu, and H. Gu Ultra-violet Detectors Based on Wide Bandgap Semiconductor Nanowire: A Review//Sensors, 18(2072), p.1-25 (2018).
- [3] A. Rogalski, Z. Bielecki, J. Mikołajczyk and J. Wojtas Ultraviolet Photodetectors: From Photocathodes to Low-Dimensional Solids// Sensors, 23(4452), p. 1-66 (2023).
- [4] S. Xu, J. Luo, H. Song, J. Tang Recent advances in monolithic integrated lead based optoelectronic devices//Frontiers of Optoelectronics, 18(13), p.1-15 (2025).
- [5] D. Renker, E. Lorenz Advances in solid state photon detectors//Journal of Instrumentation, 4(4), p. 1-54 (2009).
- [6] W. Ouyang, J. Chen, Z. Shi, X. Fang Self-powered UV photodetectors based on ZnO nanomaterials//Appl. Phys. Rev., 8(3), 031315 (2021).
- [7] R. Jalal, K. Ozel, A. Atilgan, A. Yildiz UV photodetectors based on W-doped ZnO thin films//Nanotechnology, 35(26), p.1-11 (2024).
- [8] Y. Al-Handarish, O. M. Omisore, T. Igbe, S. Han, H. Li, W. Du, J. Zhang, L. Wang A Survey of Tactile-Sensing Systems and Their Applications in Biomedical Engineering//Advances in Materials Science and Engineering, 2020(ID 4047937), p.1-17 (2020).
- [9] J. H. Chuah, D. Holburn Design of Low-Noise High-Gain CMOS Transimpedance Amplifier for Intelligent Sensing of Secondary Electrons//IEEE Sensors Journal, 15(10), p. 5997-6004 (2015).
- [10] Z. Li, J. Cheng, F. Liu, Q. Wang, W.-W. Wen, G. Huang, Z. Wu Research on the Technological Progress of CZT Array//Detectors Sensors, 24(725), p.1-42 (2024).
- [11] B. Ge, Y. Li, H. Yu, S. Yong, J. Shen, D. Xi, Q. Xie An ultra-low power 10-bit 40 MS/s Successive-Approximation-Register (SAR) Analog-to-Digital Converter (ADC) for single photon SiPM detector in X-ray applications//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 1072(170214), p.1-6 (2025).
- [12] Y. Zhou, W. Zhang, T. Wu, W. Chen, S. Du, D. Hao High-precision vernier-type optoelectronic integrated chip design//Microelectronics Journal, 153(106400), p.1-11 (2024).
- [13] S. Shajari, K. Kuruvinashetti, A. Komeili, U. Sundararaj, Review The Emergence of AI-Based Wearable Sensors for Digital Health Technology: A Review// Sensors, 23(9498). p.1-36 (2023).
- [14] P. S. Girão, P. M. P. Ramos, O. Postolache, J. M. D. Pereira Tactile sensors for robotic applications//Measurement, 46(3), p 1257-1271, (2013).
- [15] P. Weiss The Global Positioning System (GPS): Creating Satellite Beacons in Space, Engineers Transformed Daily Life on Earth//Engineering, 7(3), p. 290–303 (2021).
- [16] Y. Boukdir, H. E. Omari Novel high precision low-cost dual axis sun tracker based on three light sensors//Heliyon, 8(12), p.1-11 (2022).
- [17] T. Zhou, J. Zhao, Y. He, B. Jiang, Y. Su A Readout Integrated Circuit (ROIC) employing self-adaptive background current compensation technique for Infrared Focal Plane Array (IRFPA)//Infrared Physics & Technology, 90(5), p. 122-132 (2018).
- [18] M. Choi, M. Lee, B. Lee, Y. T. Lee Multistage opto-neuromorphic process system based on commercial optoelectronic devices//Current Applied Physics, 20(10), p. 1125–1129, (2020).
- [19] S. Meti, K. B. Balavald, B. G. Sheeparmatti MEMS Piezoresistive Pressure Sensor: A Survey//Int. Journal of Engineering Research and Applications, 6(4), pp. 23-31 (2016).
- [20] P. Jinka, R. Tirumala Design of XOR-NMOS switch based kickback noise reduction technique for dynamic comparators//e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 7(100416), p.1-7 (2024).
- [21] J. Gao, X. Yang, X. Shi, Z. Gao, K. Nie, J. Xu Two ramp reference voltages CDS

- scheme applied to low noise and high dynamic range PWM pixel//Microelectronics Journal, 135(105744), p.1-8 (2023).
- [22] R. Borgohain, S. Baruah Design and analysis of UV detector using ZnO nanorods on interdigitated electrodes//ADBU Journal of Engineering Technology, 4(1), p. 134-136 (2016).
- [23] Y.-C. Chiu, P.S. Yeh, T.-H. Wang, T.-C. Chou, C.-Y. Wu, J.-J. Zhang An Ultraviolet Sensor and Indicator Module Based on p-i-n Photodiodes// Sensors, 19(4938), p. 1-8 (2019).
- [24] H. Andrade, A. Maharry, T. Hirokawa, L. Valenzuela Analysis and monolithic implementation of differential transimpedance amplifier//Journal of Lightwave Technology, 38(16), p. 4409–4418 (2020).
- [25] J. Qin, Z. Yan, M. Huo, X. Ji, and K. Peng Design of low-noise photodetector with a bandwidth of 130 MHz based on transimpedance amplification circuit//Chinese Optics Letters, 14(12), pp. 1-8 (2016).
- [26] S. Park, S. Lee, B. Seo, D. Jung, S. Choi, S.-M. Park A Low-Noise CMOS Transimpedance-Limiting Amplifier for Dynamic Range Extension//Micromachines, 16(2), 153, p. 1-15 (2025).
- [27] K. Achtenberg, Z. Bieleck Comparative Analysis of the Selected Photoreceiver Input Stages in Terms of Noise//Sensors, 25(1359), p. 2-19 (2025).
- [28] B. Moeneclaey, J. Verbrugghe, J. Lambrecht, E. Mentovich, P. Bakopoulos, J. Bauwelinck Design and experimental verification of a transimpedance amplifier for 64-gb/s pam-4 optical links//J. Light. Technol. 36(2), p. 195–203 (2018).
- [29] H.-J. Kim, D.-Y. Lee, M.-J. Park Development and validation of a 64-channel ROIC prototype for SWIR line scan sensor applications//Integration, 98(102226), p.1-8 (2024).
- [30] Y. Nie, S. Jiao, S. Yang, J. Jing, S. Zhang, Z. Shi, H. Lu, D. Wang, S. Gao, X. Wang, Y. Zhang, Z. Fu, A. Li, J. Wang The excellent performance of β -Ga₂O₃ Schottky photodiode under forward bias and its application in solar-blind ultraviolet communication//Materials Today Physics, 33 (101032), p.1-10 (2023).
- [31] E. Süleyman, M. Atasoyu 45-nm CMOS Inverter Transimpedance Amplifier for LiDAR Applications//Journal of Brilliant Engineering, 3(4915), p.1-8 (2024).

Стаття надійшла до редакції 21.09.2025 р.

PACS 07.07.Df, 42.70.Qs

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.4.339704>

DEVELOPMENT AND MODELING OF A UV-PHOTORESISTANT MODULE BASED ON THIN-FILM ZINC OXIDE

I. S. Virt, I. V. Padalka

Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University,
Faculty of Physics, Mathematics, Economics and Innovative Technologies,
24 Ivana Franka St, Drohobych, 82100, Ukraine,
e-mail: isvirt@dspu.edu.ua, ivan.padalka@dspu.edu.ua

Abstract. Article describes the photoelectric properties of the simulated forming and amplifying cascades in a photodetector that detects ultraviolet radiation. A module containing a monolithic sensor indicator device based on a basic zinc oxide photoresistor and a transimpedance amplifier (TIA) has been created. Based on the results obtained, a simple radiation detector with a two-stage differential amplifier was proposed and tested. At a bias voltage of 4 V, the sensitivity of the photomodule was obtained at $5 \cdot 10^4$ V/W. The noise of the cascades in the dark current modes and under illumination with a standard industrial LED was compared and the signal bandwidth was analyzed.

Keywords: radiation detection, photoresistor, UV-sensors, transimpedance amplifier, zinc oxide