

УДК 621.39

**ANALYSIS OF PHOTO DETECTORS USED IN SENSOR NETWORKS
АНАЛІЗ ФОТОДЕТЕКТОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В СЕНСОРНИХ
МЕРЕЖАХ****Irkha V.I. / Ірха В.І.***s.ph-m.s., as.prof. / к.ф.-м.н., доц.***Markolenko P.Yu. / Марколенко П.Ю.***s.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0001-5636-5111

*State University of Intellectual Technology and Communication, Odessa, Kuznechna 1, 65029
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, вул. Кузнечна 1, 65029*

Анотація. В роботі розглядаються основні проблеми побудови сенсорних мереж, що стосуються споживання енергії мережі та залежності її роботи від пропускної здатності базових станцій. Одними з найважливіших елементів мережі є фотоприймачі, робота яких впливає на швидкість та і цілність передачі інформації. Саме тому в роботі розглянуті сучасні конструкції світлових фотодетекторів, їх основні характеристики та недоліки. Запропоновані фотоприймачі можуть покращити швидкість передачі даних в сучасних сенсорних мережах.

Ключові слова: сенсорні мережі, базові станції, пропускна здатність, фотоприймачі, швидкість, цілність, передача інформації.

Вступ.

Існують дві основні проблеми побудови сенсорних мереж: по-перше, сенсорні мережі споживають основну частину енергії мережі, а по-друге, час роботи всієї мережі залежить від пропускної станції базових станцій, оскільки обробка даних, отриманих від датчиків, підтримується на технологіях роботи окремих датчиків. Для вирішення другої проблеми швидкості та ефективності сенсорних мереж на разі впроваджується апаратно програмні рішення для оптимізації трафіку з використанням пакету нових технологій MEC (Multi-Access Edge Computing) або ECMA (Edge Computing with Multiple Access). Справа в тому, що більшість програм надають свої онлайн-обчислення (обробка даних) і зберігання контенту на віддалених серверах (хмарні обчислення), які зазвичай розташовані далеко від кінцевого користувача. При використанні технологічного пакету MEC частина функцій обробки та зберігання даних виконується на межі бездротової сенсорної мережі за допомогою спеціального MEC Server, інтегрованого в базові станції.

Архітектура MEC включає в себе набір ключових технологій для інтеграції IoT у бездротові системи. Важливішими з яких є:

- віртуалізація мережевих функцій (NFV);
- програмно визначена мережа (SDN);
- інформаційно-визначена мережа (ICN);
- розривання мережі (NS).

Це дає можливість проводити фільтрацію трафіку, полегшує можливість прийняття рішень на основі локально оброблених даних на межі мережі, що зменшує наскрізну затримку (E2E), підвищує масштабованість і термін служби пристроїв IoT.



Але застосування будь-яких технологій може бути обмеженим властивостями елементів системи мережі. Одним із таких елементів є фотоприймач, швидкість дії якого може істотно впливати на швидкість та щільність передачі даних в мережі. Тому в роботі розглянуті основні типи та конструкції фотоприймачів, що можуть використовуватись в таких мережах.

1. Сучасний стан сенсорних мереж.

Напівпровідникові фотоприймачі використовуються в якості чутливих елементів в усіх відеокамерах, датчиках руху, детекторах полум'я, пірометрах, світлових індикаторах, у фотореле у системах вуличного освітлення, тепловізорах, люксометрах, приладах нічного бачення, як джерело напруги в сонячних батареях. Однак, основна частина фотодетекторів – це невід'ємна частина всієї системи оптичного зв'язку, яка приймає корисний оптичний сигнал та перетворює його в електричний.

За прогнозами Cisco, у 2024 році кількість об'єктів Інтернету речей (IoT) зросте більш ніж до 50 мільярдів підключених пристроїв. Необхідно забезпечити високошвидкісний зв'язок для великої кількості користувачів одночасно.

Швидкість і щільність передачі інформації по оптичних каналах зв'язку в сотні разів вище, ніж по радіоканалах. У зв'язку з цим протягом десятиліть ведуться дослідження щодо розробки технології побудови оптичної бездротової локальної мережі Li-Fi, яка б стала альтернативою використанню поширеного радіоканалу бездротової локальної мережі Wi-Fi, мережі. Такі фірми, як General Electric (США), Koninklijke Philips NV (Нідерланди), Oledcomm (Франція), pureLiFi Limited (Велика Британія), Panasonic Corporation (Японія), Acuity Brands, Inc. (США), LightPointe Communications Inc. (США), LightBee Corporation (США), FSONA Networks (Великобританія) вже виробляють обладнання для побудови оптичних бездротових локальних мереж.

Li-Fi (Light Fidelity) – технологія побудови бездротової оптичної локальної мережі, яка реалізована як конкурент радіоканалу локальної мережі Wi-Fi (Wireless Fidelity) [1], що використовує соціальне освітлення як канал для передачі даних.

Зовнішні електронні USB-ключі для використання технології Li-Fi вже давно виробляються масово, а з 2020 року компанія Getak Technorlogy Corp випускає планшети з вбудованою функцією Li-Fi. Завдяки цим великим гравцям ринок Li-Fi став надзвичайно конкурентним [2].

Провідні українські дистриб'ютори обладнання для систем освітлення вже представляють готову продукцію для організації локальних Li-Fi мереж. Інтегрований світлодіодний світильник PureLiFi служить точкою доступу Li-Fi і оснащений маршрутизатором і драйвером лампи. Він сумісний зі світлодіодами кількох різних виробників. Наразі гаджети повинні використовувати зовнішній ключ із виходом USB для отримання та декодування даних низхідної лінії зв'язку та модуляції сигналу завантаження для передачі інформації висхідної лінії зв'язку через канал Li-Fi.

2. Сучасні конструкції фото детекторів.

В даний час в техніці використовуються тільки напівпровідникові



фотоприймачі, які відрізняються принципом перетворення світлової енергії в електричний сигнал. Серед них фоторезистор – це в найпростішому випадку напівпровідникова пластина з двома омичними контактами. Фоторезистор використовує ефект фотопровідності - підвищення провідності зразка напівпровідника в результаті генерації електронно-діркових пар фотонами. Струм в основному формується основними носіями Δp , оскільки вони вільно проходять через омичні контакти. Неосновні носії Δn зберігаються на одному з контактів, де вони викликають додаткову ін'єкцію основних носіїв, доки вони не об'єднуються. Завдяки такій властивості неосновних носіїв заряду, які накопичуватися біля одного з омичних контактів фоторезистор має внутрішнє посилення фотоструму. Основною перевагою фоторезисторів є велике внутрішнє посилення фотопровідності $G_{pc} \sim 20 \div 100$. яке можна отримати, якщо пристрої виготовлені з матеріалів з великим часом життя неосновних носіїв τ_n . Але при цьому зменшується частота роботи фотоприймача f_{max} . Тому внутрішнє посилення фоторезистора найчастіше збільшується шляхом зменшення часу проходження бази резистора основними носіями заряду

$$t_p^{TRANS} = \frac{d^2}{\mu_p \cdot U},$$

а це вимагає високої рухливості μ_p і короткої відстані d між

електродами. Недоліками фоторезисторів є великий темповий струм I_{DARK} , низька робоча частота f_{max} і сильна залежність вихідного струму від зовнішньої температури. Крім того, фоторезистор споживає велику кількість енергії через великий темновий струм. Залежність струму через фоторезистор від освітленості (вихідна характеристика фотодетектора) нелінійна.

Так, у роботі [4] представлено сучасну комплексну конструкцію фотоприймача GaAs на основі структури метал-напівпровідник-метал, в якій напівпровідниковий шар епітаксіально вирощено на підкладці Si. Вирощування GaAs здійснюється за допомогою ультратонких низькотемпературних прошарок Ge. Результат показують чудову світлочутливість $(0,54 \pm 0,15)$ А/Вт.

Фотодіод – *p-n*-перехід із прозорим вікном у корпусі приладу для надходження світла на базу приладу. У фотодіоді використовується фотогальванічний ефект – електронно-діркові пари, створені фотонами, розділяються вбудованою різницею потенціалів *p-n*-переходу, що значно збільшує дрейфовий струм через перехід при освітленні.

Завдяки фотоелектричному ефекту внутрішнього розділення фотоносіїв заряду, будь-який фотодіод може бути використаний як джерело напруги – сонячна батарея, яка перетворює світлову енергію в електричну. Носії заряду, створені світлом, будуть розділятися, доки напруга, створювана світлом, не компенсує вбудовану різницю потенціалів. Для збільшення струму, який створює сонячна батарея, площа робочої основи переходу робиться великою. Коли фотодіод використовується як фотодетектор, зворотна зовнішня напруга прикладається до *p-n*-переходу для отримання мінімального темного струму I_{DARK} . Основною перевагою фотодіода є малий темповий струм I_{DARK} . Фотодіод потребує стабільної зовнішньої напруги живлення для суворого фіксування робочої точки для отримання лінійної вихідної характеристики. Недоліками



фотодіода є повна відсутність внутрішнього підсилення $G_{PH} = 1$, недостатня робоча частота f_{max} залежність вихідного струму від зовнішньої температури.

Було запропоновано нову архітектуру фотодіодного детектора з резонансними осередками, в якій дзеркала замінені на ґратчасті метаповерхні. Показано, що структуровані фотодетектори середнього ІЧ-діапазону товщиною менше 10 мкм з поглиначем світла HgCdTe товщиною 75 нм можуть забезпечити неперевершену максимальну ефективність [5].

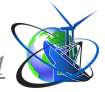
Фотодіоди на основі змішаних одновимірних (1D) і тривимірних (3D) *p-n*-гетероструктур із синергічними властивостями різних розмірів показали унікальні оптичні властивості завдяки великим перехідним площам і високому поперечному перетину поглинання, що забезпечує відмінну оптико-електронні характеристики. Однак через складність проектування та створення належного 1D-3D *p-n-j*-переходу їхні електронні властивості все ще неясні. У [6] структуру 1D-3D ZnO / CsPbBr₃ *p-n*-переходу створено шляхом вирощування кристалічних мікропластин CsPbBr₃ на нанодротах ZnO в рідкій фазі, які виявляють чудові фотодетекторні властивості. Як фотодетектор він охоплює світло від ультрафіолетового до видимого світла.

P-i-n-фотодіод – це фотодіод, в якому *p*- та *n*-області переходу розділені шаром ізолятора для зниження бар'єрної ємності *p-n*-переходу, за рахунок чого збільшується робоча частота фотоприймача f_{max} . *P-i-n*-фотодіод також використовує фотогальванічний ефект. Основними перевагами *p-i-n*-фотодіода є малий темповий струм I_{DARK} і велика робоча частота фотоприймача f_{max} . *P-i-n*-фотодіод потребує стабільної зовнішньої напруги живлення для точного фіксування робочої точки для отримання лінійної вихідної характеристики. Недоліком *p-i-n*-фотодіода є повна відсутність внутрішнього посилення $G_{PH} = 1$.

Розглядаються сучасні конструкції германієвого *p-i-n*-фотодетектора з резонансною метаповерхнею нормального падіння для вирішення проблеми компромісу між квантовою ефективністю детектора, його робочою частотою та довжиною хвилі випромінювання, яке поглинається в базі діоду. Завдяки надтонкому внутрішньому шару ізолятора товщиною 350 нм, досягається висока зовнішня квантова ефективність понад 60% і чітке розпізнавання імпульсів світлового сигналу на швидкості передачі інформації 20 Гб/с.

Нова сучасна конструкція високошвидкісного *p-i-n*-фотодетектора нормального падіння на основі GeSn представлена в [7]. Щоб реалізувати високошвидкісне виявлення в усіх діапазонах зв'язку, було оптимізовано концентрацію домішки Sn в поглинаючому шарі, товщину поглинаючого шару та розмір пристрою. Чутливість пристрою зі стороною вікна 18 мкм при товщині 1550 нм досягає 0,32 А/Вт з розширеною довжиною хвилі відсічення 1700 нм (інфрачервоний діапазон світла) і смугою пропускання 3 дБ до 28 ГГц при зміщенні 3 В.

Ведеться розробка германієвих вертикальних *p-i-n*-фотодіодів з масивом заглиблень у формі гарбуза на поверхні бази. Фотодіоди виготовлені на германієвій підкладці з чудовою чутливістю 0,74 А/Вт. За допомогою моделювання підраховано, що конструкція заглиблень у формі гарбуза забезпечує більш високе оптичне поглинання порівняно з отвором у формі



циліндра.

Також у *p-i-n*-фотодіоді для захоплення фотонів вперше були введені мікроструктури в базу фотодетектора на основі Ge-Sn за рахунок чого було досягнуто високоефективне детектування випромінювання на довжині хвилі 2 нм з чутливістю 0,11 А/Вт. Демонстраційний зразок був реалізований за допомогою Ge-Sn/Ge множинної квантової ями (MQW).

Лавинний фотодіод (APD) – це *p-i-n*-фотодіод, який працює при високих зворотних напругах, достатніх для ударної іонізації атомів швидкими носіями заряду. На відміну від звичайного *p-i-n*-фотодіоду це пристрій із внутрішнім посиленням. Він використовує фотогальванічний ефект разом з лавинним помноженням фотоносіїв – це збільшення числа носіїв заряду при зіткненнях високошвидкісних носіїв заряду з атомами. При збільшенні зворотної напруги на *p-n*-переході до деякого порогового значення носії заряду в сильному електричному полі *p-n*-переходу починають набирати швидкість, достатню для іонізації ними атомів з утворенням електрон-дірочних пар – нових носіїв заряду. Самі нові утворені носії заряду беруть участь у подальшій іонізації. Процес збільшення концентрації носіїв, а отже, і струму, має лавиноподібний характер. Основними перевагами лавинного фотодіода є великий коефіцієнт посилення фотоструму $G_{AV} \sim 100$ і велика робоча частота f_{max} . Лавинний фотодіод має велику чутливість: він може виявляти більш слабкі оптичні сигнали. Недоліками лавинного фотодіода є високий рівень сторонніх шумів у вихідному сигналі і сильна залежність вихідного струму від зовнішньої напруги і температури. Вихідна характеристика лавинного фотодіода нелінійна. Крім того, лавинний фотодіод вимагає більшої напруги зміщення, тому він споживає багато енергії. Лавинний фотодіод є кращим фотодетектором для аерофотозйомки та для високошвидкісного оптоволоконного зв'язку на великі відстані завдяки його внутрішньому посиленню, яке забезпечує запас чутливості порівняно зі звичайними *p-i-n*-фотодіодами. Чутливість лавинного фотодіода на 5-10 дБ вища, ніж звичайного *p-i-n*-фотодіода, за умови, що шум множення низький, а добуток посилення на смугу пропускання достатньо великий. Для високошвидкісного оптичного зв'язку запропоновано новий малошумний лавинний фотодіод на основі традиційного матеріалу InP з нанорозмірними квантовими ямами в базі діода.

Великий інтерес представляє розробка малошумливих лавинних фотодіодів в короткохвильовій інфрачервоній області (1,5-3 нм) і в середньохвильовій інфрачервоній області (3-5 нм). Сучасні лавинні фотодіоди засновані на міжзонних переходах у телурид ртуті-кадмію (HgCdTe) з високим підсиленням і низьким коефіцієнтом надлишкового шуму завдяки сприятливій зонній структурі, яка сприяє ударній іонізації одного носія. Однак, при кімнатній температурі для коефіцієнта множення лавини 10 темновий струм такого лавинного фотодіода є високим, що вимагає криогенного охолодження. А це потребує додаткових витрат ресурсів.

Фототранзистор – це транзистор із відкритим вікном в корпусі прибору для влучення падаючого світла на базу транзистора. Фототранзистор використовує фотогальванічний ефект з додатковою інжекцією носіїв заряду. При цьому



генеровані світлом неосновні носії, як у фоторезисторі, накопичуються в базі транзистора і знижують потенційний бар'єр емітерного переходу, що призводить до додаткової інжекції носіїв заряду з емітера в базу та далі в колектор. Це додатково збільшує вихідний фотострум пристрою. Фототранзистори в одному пристрої об'єднують здатність захоплення світла в емітерному $p-n$ -переході при зворотному зміщенні (як в фотодіодах) та функцію посилення сигналу (як в фоторезисторах), тому мають вищу оптичну здатність виявляти слабкий оптичний сигнал та нижчий рівень шуму порівняно з фоторезисторами та фотодіодами.

Основними перевагами лавинного фототранзистора є велике посилення фотоструму $G_{PT} \sim 20$. Фототранзистору потрібна стабільна зовнішня напруга живлення для точного фіксування робочої точки при отриманні лінійної вихідної характеристики. Недоліками фототранзистора є сторонні шуми у вихідному сигналі, недостатня робоча частота f_{max} , залежність вихідного струму від зовнішньої температури. Крім того, фототранзистор може споживати багато енергії. Для підвищення ефективності поверхню бази сучасних фототранзисторів вдосконалюють шляхом створення на ній спеціальних комплексів для поліпшення захоплення фотонів.

Оптоелектроніка на основі квантових точок (КТ) привернула значний інтерес для широкого використання завдяки своїм унікальним фотофункціональним можливостям, таким як чудовий коефіцієнт оптичного поглинання, здатність регулювати ширину забороненої зони залежно від довжини хвилі падаючого світла та простоту рішень для вдосконалення властивостей фотодетекторів. Проте вплив поверхні з квантовими точками на оптоелектронні властивості детектора залишається незрозумілим. У [8] описано результати експериментів з дослідження властивостей високочутливих гібридних фототранзисторів CdSe з квантовими точками, оброблених у розчині аморфно-оксидних напівпровідників з високоефективним фотоіндукованим транспортом носіїв заряду з використанням поверхневої функціоналізації лігандів молекулярних халькогенідів металів.

Двовимірні (2D) ламінати отримали значну увагу завдяки своїй унікальній кристалічній структурі та видатним оптичним і електричним властивостям у фотоелектричному детектуванні. Однак більшість 2D матеріалів дуже чутливі до навколишнього середовища. Адсорбації і пастки, що вводяться в процесі підготовки, негативно впливають на роботу пристроїв на основі цих матеріалів.

Розглядається нова конструкція фототранзистора із розширеним короткохвильовим інфрачервоним спектром поглинання (e-SWIR) на основі гетеропереходу InP із надгратками InGaAs/GaAsSb (T2SL) в якості поглиначів. Монолітне вирощування фототранзистора на підкладці InP має низку переваг, таких як властивість узгодження параметрів кристалічної решітки гетеропереходу з необхідною шириною забороненої зони фоточутливої області за рахунок використання системи матеріалів гетеропереходу на основі сполуки InP/InGaAs/GaAsSb.

У роботі [9] стверджується, що практичне застосування неорганічних фотодетекторів значно обмежене через багато недоліків, включаючи складні



виробничі процеси та низьку механічну гнучкість. У цієї роботи розглядається конструкція органічних фототранзисторів на базі нових фоточутливих органічних матеріалів. В висновках роботи стверджується, що нові органічні фототранзистори постають як потенційні конкуренти з вражаючими характеристиками продуктивності, такими як висока гнучкість і простота виготовлення, що робить їх придатними для електронних пристроїв наступного покоління.

Завдяки своїм оптичним властивостям і чудовій рухливості носіїв заряду галогенідні перовскіти металів були широко вивчені в області фотодетекторів для сонячних елементів. У перовскітних фотодетекторах їхнє високе оптичне поглинання та чудова квантова ефективність сприяють підвищенню чутливості та детективності.

Висновки

В роботі був проведений системний аналіз існуючих фотодетекторів, які можуть використовуватись в сенсорних мережах, з метою визначення найкращих серед них, для застосування. Показано, що на наш погляд найперспективнішими є фотодетектори: малошумний лавинний фотодіод на основі InP з нанорозмірними квантовими ямами в його базі та фототранзистори із розширеним короткохвильовим інфрачервоним спектром поглинання (e-SWIR) на основі гетеропереходу InP із надгратками InGaAs/GaAsSb (T2SL) в якості поглинача, тому, що вони мають більшу енергонезалежність, покращену швидкодію, та мають менший вплив з боку зовнішніх чинників.

Література:

1. Макаренко В. Технология LI-FI как альтернатива WI-FI. *Электронные компоненты и системы*. 2020. № 1. С. 46-51.
2. Li-Fi: Wireless data from every light bulb. Офіційний сайт Lifi.co. URL: <https://lifi.co/>.
3. Li-Fi – коммунікації с помощью света. Офіційний сайт виробничої фірми VD MAIS Ukraine. URL: <https://vdmiais.ua/news/inzhenernoe-chtivo-li-fi-kommunikatsii-s-pomoshhyu-sveta#>.
4. Dushaq G., Rasras M. Thin Film GaAs Photodetector Integrated on Silicon using Ultra-Thin Ge Buffer Layer for Visible Photonics Applications. *Asia Communications and Photonics Conference – International Conference on Information Photonics and Optical Communications (ACP-IPOC)*. 2020. V. FTu2E. P. 5-12. DOI: <https://doi.org/10.1364/FIO.2020.FTu2E.5>.
5. Avrahamy R., Zohar M., Auslender M., Hava S. et al. Upmost Efficiency Mid IR Thin HgCdTe Photodetectors. *Asia Communications and Photonics Conference – International Conference on Information Photonics and Optical Communications (ACP-IPOC)*. 2020. V. JTu2D. P. 21-29. DOI: https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2020.JTu2D.21.
6. Liu J., Liu F., Liu H. et al. Mixed-dimensional CsPbBr₃@ZnO heterostructures for high-performance p-n diodes and photodetectors. *Nano Today*. 2021. V. 36. P. 101055-101069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2020.101055>.
7. Wang N. High-Performance GeSn Photodetector Covering All



Telecommunication Bands. *IEEE Photonics Journal*. 2021. V. 13. №. 2. P. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3065223>.

8. Kim J., Park J. B., Kim M. G., Park S. K. Correlation Between Surface Functionalization and Optoelectronic Properties in Quantum Dot Phototransistors. *IEEE Electron Device Letters*. 2021. V. 42. №. 4. P. 553-556. DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3061948>.

9. Zhao C., Ali M. U., Ning J. et al. Organic single crystal phototransistors: Recent approaches and achievements. *Frontiers of Physics*. 2021. V. 16. P. 43202-43219. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.02149>.

Abstract. *The paper examines the main problems of building sensor networks related to network energy consumption and the dependence of its operation on the throughput of base stations. One of the most important elements of the network are photodetectors, the operation of which affects the speed and density of information transmission. That is why the work discusses modern designs of light photodetectors, their main characteristics and disadvantages. The proposed photodetectors can improve the data transfer rate in modern sensor networks.*

The introduction discusses the design principles and architecture of sensor networks. The first part is devoted to the current state of networks and prospects for their development. The second part examines the designs and operating principles of various photodetectors. Based on an analytical comparison of their characteristics and properties, it is proposed to use certain of them as optimal for building sensor networks.

From a comparative analysis of photodetectors, in our opinion, the most promising photodetectors are: a low-noise avalanche photodiode based on InP with nanosized quantum wells in its base and phototransistors with an extended short-wave infrared absorption spectrum (e-SWIR) based on an InG heterojunction of absorber quality, because they have a higher energy independence, improved performance and are less influenced by external factors.

Key words: *sensor networks, base stations, bandwidth, photodetectors, speed, density, information transmission.*

Стаття відправлена: 19.12.2023 р.

© Марколенко П.Ю.