



УДК 53.08, 544.6:544.5, 549.3, 62.98, 621.3

Мікромініатюрні сенсори тиску на основі діодних структур

В. А. Клименко^f,  [0000-0002-6035-5511](https://orcid.org/0000-0002-6035-5511)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  [00syn5v21](https://rscg.org/00syn5v21)
Київ, УкраїнаТ. В. Семікіна^s, к.т.н. с.н.с.,  [0000-0002-6182-4703](https://orcid.org/0000-0002-6182-4703)ІФН ім. В. Є. Лашкарьова НАН України  [01qfgm256](https://rscg.org/01qfgm256)

Київ, Україна

Анотація—В роботі проведено детальний аналіз сучасних мікромініатюрних датчиків тиску виконаних на різноманітних діодних структурах. Показані можливі області застосування таких датчиків, їх головні переваги та недоліки. Проведено дослідження діодних гетероструктур на основі CdS / ZnS / CuS / CdTe та показано перспективність використання датчиків тиску на основі цих матеріалів в якості аналогу існуючих напівпровідникових приладів. На основі проведених експериментальних досліджень обґрунтовано, що ці структури є п'єзоелектричними. Наведені конструктивні схеми досліджених структур та їх вольт-амперні характеристики. Описані можливі області застосування таких структур. Надані конструктивні схеми та параметри отриманих діодних структур можуть бути цікавими для широкого кола фахівців в області сенсорної техніки та автоматизації різноманітних технологічних процесів виготовлення мікроелектронної апаратури. Показано, змінюючи технології виготовлення датчиків та концентрацію хімічних елементів в отриманих плівках можна змінювати чутливість датчика та динамічний діапазон його роботи, пристосовуючи параметри датчика до галузі його застосування в відповідній вимірювальній електронній апаратурі та в системах контролю тиску.

Ключові слова — гетероструктура; діод; датчик тиску; п'єзоелектр; конструктивна схема; вольт-амперна характеристика; чутливість; динамічний діапазон

І. Вступ

Сучасний прогрес в області виробництва електронної техніки нерозривно пов'язаний з бурхливим розвитком матеріалознавства, зокрема з розробкою і освоєнням нових діелектричних та напівпровідникових матеріалів та їх комбінацій. Під час створення нових типів електронних приладів та пристроїв необхідне глибоке знання комплексу властивостей матеріалів, із яких їх виготовляють, та від яких напряму залежать фізичні властивості та умови експлуатації цих приладів. Це стосується і різного роду датчиків тиску. За визначенням датчик – це завершений пристрій на основі чутливого елемента, який включає в себе за потреби пристрій підсилення сигналу, лінеаризації, калібрування, АЦП та інтерфейсу, тоді як сам чутливий елемент називається сенсором.

Довгий час на ринку датчиків тиску домінували мікро-електро-механічні системи (MEMS) завдяки їхній чудовій продуктивності та можливостям мініатюризації. Однак останнім часом актуальними стали розробки датчиків тиску на основі гетероперехідних

діодів, які все частіше використовуються як біосенсори в медичних електронних пристроях. Загалом технологія виготовлення гетероперехідних діодів пов'язана із злиттям двох різноманітних напівпровідникових матеріалів з дотриманням відповідного температурного режиму. Завдяки поєднанню фізичних властивостей різноманітних матеріалів такі гетероструктури знаходять широке застосування в біоелектроніці та також у виготовленні мініатюрних датчиків MEMS. В літературі переважно розглянуто багато різних комбінацій таких керамічних матеріалів, як GaN / AlGaIn, Au / ZnO, NiO / ZnO, Si / ZnO, кожен з яких має свої переваги та недоліки, згідно з відповідними фізичними властивостями [1]–[3].

Крім того, органічні оптоелектронні пристрої, такі як OLED, OFET (органічні польові транзистори) та OPV (органічні фотоелементи), виконані у вигляді гетероперехідних діодів, на сьогодні вже інтегрують у сумісні оптико-механічні мікропристрої, що розширює діапазон їх застосування, зокрема як і сенсорів тиску. [4]



II. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Через високу актуальність розробок приладів та пристроїв на основі діодних структур було поставлено наукову задачу щодо проведення порівняння наших тонкоплівкових сенсорів на гетероперехідних діодах із існуючими аналогами на ринку, та перевірити їх ефективність й можливість заміщення. Метою досліджень в цьому напрямку є розширення й пошук нових областей застосування таких приладів та їх промислове впровадження в ефективні системи вимірювання тиску з метою зниження собівартості продукції, підвищення її надійності та спрощення обслуговування. Таким чином розглянемо створені діодні гетероструктури на CdS / ZnS / CdTe / CuS та актуальні структури на ринку, і через порівняльний аналіз сформулюємо їхні головні переваги та недоліки.

III. АНАЛІЗ РИНКУ ДАТЧИКІВ ТИСКУ НА ОСНОВІ ДІОДІВ

Після відкриття п'єзорезистивності в кремнію в середині 1950-х років почали широко виробляти датчики тиску на його основі. Завдяки бурхливому розвитку технології виробництва інтегральних схем технологія процесу мікрообробки розвивалась швидкими темпами, запозичуючи відповідні матеріали, процеси та набори інструментів. Як результат мікроелектро-механічні системи захопили великі сегменти існуючих ринків датчиків і сприяли розвитку нових ринків. Науковці протягом останніх років приділяють велику увагу технологіям виробництва MEMS. Це пов'язано із великими перспективами підвищення мініатюризації та продуктивності пристроїв MEMS порівняно зі звичайними напівпровідниковими пристроями. Датчики тиску MEMS вже давно поширені на ринку датчиків тиску та продовжують домінувати над іншими [5].

A. Датчики тиску на OLED

Органічні оптоелектронні пристрої, такі як органічні світловипромінювальні діоди (OLED), польові транзистори (OFET) і фотоелектричні елементи (OPV), є новітньою технологією, що розвивається сьогодні. Їхні найважливіші недоліки — короткий термін служби та низька ефективність [6]–[13] були значно покращені в останні роки завдяки інтенсивній дослідницькій та інженерній діяльності в цій галузі та впровадження в конструкцію датчиків та технологію їх виготовлення вкрай ефективних нових технічних рішень. OLED є природними джерелами, що випромінюють світло з поверхні. Вони також мають великий комерційний потенціал у освітлювальній промисловості, у мобільних і побутових пристроях для демонстраційно-відображувальних цілей у вигляді екранів з великою площею. Проте технології OLED можна інтегрувати в сумісні оптико-механічні мікропристрої, що робить можливим розширення діапазону їхнього застосування.

З іншого боку, OLED, виготовлені з багат шарових органічних тонких плівок, можна формувати на більшості підкладок, таких як скло, метали, кераміка та навіть гнучкі поверхні. Таким чином, вони також мають величезний діапазон досі невикористаних потенційних застосувань [14].

Пристрої гнучкої органічної електроніки, які можна скручувати, згинати та розтягувати, знайшли широке застосування у датчиках великої площі, які є особливо корисними у робототехніці та в обладнанні для медичного моніторингу [15]. Ці датчики, в основному, мають ту саму форму, що й їхні жорсткі аналоги, хоча вони розташовані на полімерній підкладці та мають більш надійну схему електричного підключення.

На основі OLED також розроблено та впроваджено у виробництво низка ефективних оптичних, хімічних і біологічних сенсорів [16], [17]. OLED фіксують в цих пристроях і не використовують їхню природну відповідність. Тому на сьогоднішній день вони не були реалізовані як механічні датчики. Єдиним винятком є джерела світла в гнучких хвилеводах, які діють як датчики тиску. Окрім цього, вартість виробництва оптоелектронних пристроїв швидко знижують, особливо якщо взяти до уваги інтегровані системи виявлення світла, що робить їх життєздатною альтернативною технологією, яка має переваги перед більш класичними конструкціями, такими як датчики тиску на основі кремнію [18].

На сьогодні існують варіації напівпровідникових датчиків тиску, реалізованих на світлодіодах, які починають світитися у разі прикладання навантаження, за такої умови колір та інтенсивність світла залежать від величини прикладеного тиску.

Розглянемо мікропристрій, який є чутливим до тиску, з мембраною, що зазвичай використовують в п'єзорезистивних і ємнісних датчиках тиску. Мембрана покрита шаром OLED і тонкоплівковою ізоляцією. Передбачають, що загальний пристрій, наприклад як світло-залежний резистор (CЗР), вимірює світло, випромінюване OLED через отвір.

Як показано на рис. 1, конструкція такого датчика являє собою машинно-оброблену гнучку круглу мембрану, на яку нанесено кілька шарів органічних полімерів і відповідних електродів, що утворюють загальний органічний світло-випромінюючий діод [4]. Цей шар надає відмінний захист від вологи та від проникнення кисню, тому такий пристрій має достатньо довгий термін служби, а також збільшує жорсткість мембрани, проте роздільна здатність зменшується.

Вважали, що вся поверхня OLED випромінює фотони ізотропно з постійною інтенсивністю по всій поверхні, а тому OLED необхідно покрити непрозорою маскою, яка дозволяє фотонам проходити лише через невеликий круглий отвір у центрі мембрани. На



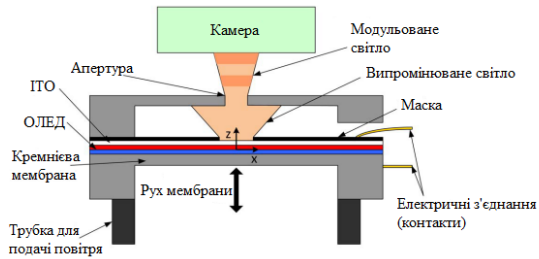


Рис.1. Схема конструкції світло-модуючого датчика тиску. Стрілки в центрі позначають систему координат, яка використовується при виведенні.

невеликій відстані над OLED є отвір, який дозволяє частині випромінюваних фотонів досягати системи виявлення та розпізнавати об'єкт. Різниця тиску на мембрані призводить до її відхилення й зміни кількості фотонів, які досягають отвору та, у свою чергу, системи виявлення. Таким чином, вихід системи виявлення є прямим вимірюванням прикладеного тиску, а гнучкі OLED можна інтегрувати в сумісні мікропристрої як корисний сенсорний компонент, який буде повністю використовувати переваги природи OLED [4].

В. Досліджені двоконтурні п'єзо резистивні сенсори на діодах

Розглянемо ще один приклад реалізації датчика тиску на діодах. Три різні конфігурації двоконтурного сенсора тиску, проілюстровані на рис. 2, можна

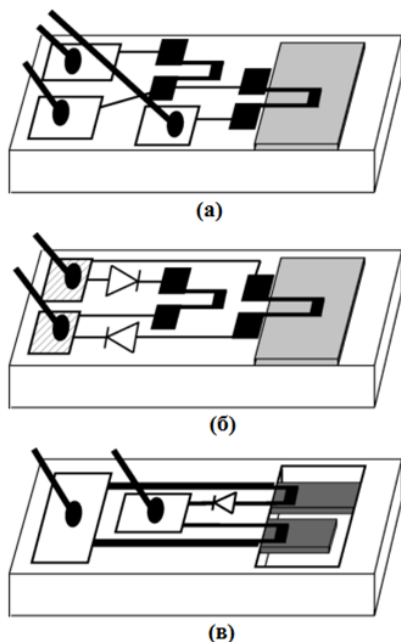


Рис.2. Схематичні зображення, що ілюструють (а) традиційну конструкцію датчика з трьома з'єднувальними дротами, (б) нове двоконтурне рішення на основі діодів і термочутливого елемента, (в) однодіодна конфігурація, де діод з'єднаний послідовно з термочутливим елементом сенсора.

використовувати для визначення сигналу температури та тиску за допомогою діодів, одночасно зменшуючи кількість контактних та з'єднувальних дротів порівняно з традиційною конструкцією, як показано на рис. 2 (б)–(в).

Датчик тиску, який використовували в цьому дослідженні, є мініатюрним датчиком тиску, розробленим для досягнення високої чутливості до тиску та ізоляції від навколишнього середовища [19]. Сенсор використовує двоконтурну конфігурацію, де один із контурів нечутливий до тиску. Його задача – вимірювання температури з метою визначення температурної компенсації. Обидва пучки розташовані в одній вакуумній порожнині, як показано на рис. 3.

Конструкція датчика складається з чутливої до тиску полікремнієвої діафрагми, яка з'єднана із тензочутливими п'єзорезисторами в кожному із контурів. Шар полікремнію, що використовували для формування діафрагми, покриває не лише порожнину, але й всю поверхню датчика. Діафрагма створює рідинний, тепловий та електричний бар'єр від навколишнього середовища як для тензодатчиків, так і електричних дротів, розташованих у вбудованому шарі полікремнію.

Деформація, викликана тиском у вигляді вигину і подовження діафрагми, визначається тензочутливими п'єзорезисторами сенсора. Різниця тиску між вакуумною еталонною порожниною та змінним середовищем відхиляє діафрагму, за рахунок чого виникає пропорційний тиску обертальний момент.

Тензодатчики в кожному контурі електрично знаходяться в прямому контакті один з одним на одному кінці. Інший кінець тензодатчиків електрично з'єднаний через один або два діоди, (рис. 2 (б)–(в)). Діоди використовувалися дискретні кремнієві з рп-переходом.

Як у дводіодній конфігурації, зображеній на рис. 2 (б), так і в конфігурації, де діод знаходиться в гілці чутливого до тиску резистора, пряме падіння напруги на діоді робить чутливість до тиску низькою.

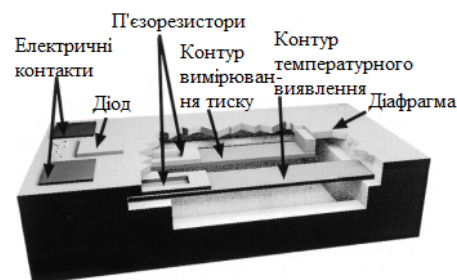


Рис.3. Схематичне зображення двоконтурного датчика тиску з температурною компенсацією.

Однак для однодіодної конфігурації, де діод знаходиться в гілці термочутливого резистора, як показано на рис. 2 (с), вимірювання тиску не залежить від прямого падіння напруги на діоді. Для одноразових мініатюрних датчиків однодіодна конфігурація також буде кращою, оскільки не потрібна ізоляція між діодами, і діод можна легко виготовити на підкладці з монокристалічного кремнію. Таким чином, однодіодна конфігурація зводить до мінімуму розмір мікросхеми та спрощує виготовлення датчика.

У двоконтурному рішенні на основі дводіодної конфігурації (рис. 2 (б)), температурно-компенсаційний тиск визначають з циклу вимірювання, що складається з фази вимірювання температури та тиску. Режим роботи в циклі вимірювання встановлюють полярністю живлення напруги і, таким чином, може керуватися ззовні [20].

IV. ДАТЧИКИ НА ГЕТЕРОПЕРЕХІДНИХ ДІОДАХ

В останні роки було розроблено велику кількість різних датчиків тиску на основі гетероперехідних діодів і гетероструктур. Такі датчики знаходять все більше широке застосування як біосенсори медичної електронної апаратури. Вважають, що широкозонні керамічні матеріали є кращими для формування гетероструктур завдяки більшій ширині забороненої зони. Такі структури забезпечують шлях для перетворення різних форм енергії, що використовують у таких напівпровідникових приладах, як фотодетектори та ультра-фіолетові сенсори. Вирішальну роль для застосування сенсорів відіграє також матеріал гетероструктури. Найбільше застосування серед існуючих гетероперехідних діодів сьогодні знаходять діоди на керамічних тонко-плівкових оксидах In_2O_3 , ZnO , Al_2O_3 , Al:ZnO та MgO [1], [21]. Дані оксиди наносять на підкладку Р-типу з метою зменшення небажаного окислення на поверхні. Існуючими підкладками, що використовують як матеріали Р-типу, є чистий кремній Si [22]–[25], NiO [26], SiC [27], діамант [28], CuO [29].

Під окрему область застосування розробляють певний тип структури гетеропереходу з відповідними параметрами чутливості та динамічного діапазону. Наприклад гетероперехідні структури ZnO знайшли використання у низці таких приладів, як біосенсори, актуатори, світловипромінювальні діоди [30], фотодетектори [31]–[34], сонячні елементи [35]–[37], датчики тиску, п'єзоелектричні наногенератори та акустичні фільтри [38]. Незважаючи на те, що сьогодні існує багато різних технологічних методів осадження матеріалів для виготовлення та дослідження експериментальних зразків на основі гетероперехідних діодів ZnO , їх фізичні та експлуатаційні властивості ще не повністю проаналізовано, як і для багатьох інших гетероструктурних датчиків.

Для прикладу розглянемо наведену на рис. 4 принципіву схему досліджуваного науковцями Si / ZnO гетероперехідного діоду.

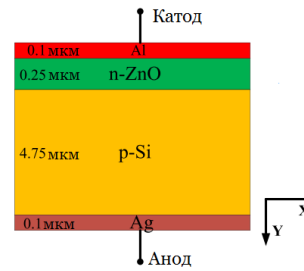


Рис.4. Схематичне зображення датчика тиску Si / ZnO гетероперехідного діоду.

Оксид цинку існує як n-тип у своїй природній формі, і він включає багато процедур легування та перетворення в р-тип провідності. Для того, щоб позбутись природнього потенціалу оксиду цинку, а також враховуючи труднощі з перетворенням його на р-тип, багато дослідників поєднали ZnO з деякими напівпровідниковими матеріалами р-типу, що призвело до утворення діода з гетеропереходом. У одній з запропонованих структур 250 нм оксиду цинку n-типу нанесено на 4750 нм кремнієвої підкладки. Структура обмежена з обох боків шаром 120 нм алюмінію (Al) зверху та 120 нм срібла (Ag) знизу. Кремній вибрали як підкладку, оскільки це дешевий та доступний у великій кількості матеріал порівняно з іншими, та щоб зменшити складність технології виготовлення датчика. Як результат, така структурна комбінація була використана у пристроях, призначених для вимірювання тиску [1].

Сьогодні високо цінуються розробки міцних твердотільних датчиків, здатних:

- працювати без охолодження в складних фізичних умовах технологічного обладнання;
- виявляти хімічні, газові, біологічні та радіаційні викиди;
- надсилати сигнали до центральних місць моніторингу.

Для досягнення цих цілей досліджують твердотільні датчики на основі гетероперехідних діодів GaN , тобто плівок з нітриду галію, приклад якої зображено на рис. 5. Технологія виготовлення таких сенсорів є складною та дорогавартісною.

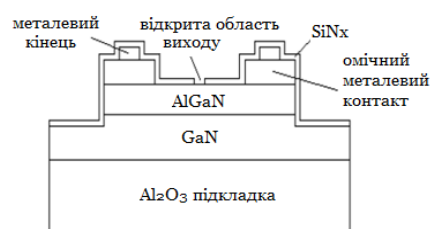


Рис.5. Схематичне зображення датчика тиску у вигляді діодної гетероструктури нітриду Ga .

П'єзоефект, як видно на [рис 6](#), створює додатковий заряд у гетероструктурі на нітридах, величина якого залежить від концентрації алюмінію. Таким чином, спонтанні та індуковані п'єзоелектричною поляризацією заряди поверхні плівок нітриду галію та на границі розділу можуть бути використані для розробки дуже чутливих, але надійних датчиків для виявлення газів, полярних рідин і механічного тиску. Гетероструктурні пристрої AlGaN / GaN можна використовувати як чутливі детектори зміни тиску й деформації.

На [рис. 7](#) показано тип датчику вимірювання тиску на основі GaN, принцип роботи якого ґрунтується на прогині нітридної плівки. Для контролю тиск датчик використовує лазерний промінь, який відбивається від тильної сторони нітридної мембрани. Важливим з конструктивної точки зору є те, що в такій конструкції датчика відсутня металізація на лицьовій стороні зразка [39].

V. ОСНОВНА ЧАСТИНА

A. Отримані структури

Отримані в результаті термічного осадження структури на основі гетероперехідного діоду, приклад схематичної конструкції одної із яких зображено на

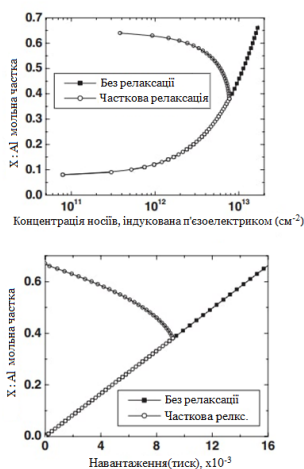


Рис.6. Залежності а) концентрації носіїв та б) напруження(тиску) від рівня концентрації плівки алюмінію з п'єзоелектричною поляризацією у складі нітриду.

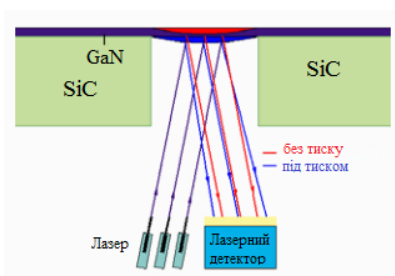


Рис.7. Один із видів датчика тиску на основі нітриду GaN.

[рис. 8](#), були експериментально досліджені та перевірені на наявність п'єзоефекту та на фоточутливість.

Усього досліджено 4 групи зразків :

1. **Foil Mo-CdS-Cu₂S** – зразки на основі гнучкої молібденової фольги, а саме плівки CdS товщиною 3 мкм, на які осаджено шар виродженого напівпровіднику р-типу Cu₂S товщиною 60 нм.
2. **Foil Mo-CdS-ZnS-Cu₂S** – зразки на основі гнучкої молібденової фольги, а саме плівки CdS товщиною 3 мкм, на які було нанесено плівки ZnS товщиною 200 нм та струмо-з'ємний контакт Cu₂S.
3. **Foil Mo-CdS-CdTe-Cu₂S** – зразки, що представляли собою класичну структуру сонячного елемента CdS-CdTe, осаджену на фольгу з молібденом і зверху нанесено Cu₂S.
4. **Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu₂S** – зразки, що представляли собою класичну структуру сонячного елемента CdS-CdTe, осаджену на ситалеву підкладку, на яку було нанесено молібденову плівку в якості нижнього струмо-з'ємного контакту, верхній контакт – Cu₂S.

Повний технологічний процес, включаючи нагрів, наплення та охолодження установки, займав 100 хвилин. Наведемо приклад режимів термічного осадження одного із зразків:

- Початковий нагрів камери – ситал знаходиться 25 хвилин в проміжку 196-228 °С.
- Нагрів камери протягом 44-45 хвилин в проміжку 550-554 °С.
- Наплення ZnS – камера 25 хвилин підтримується при температурі 546-577 °С, після чого температура піднімається до температури наплення, і протягом 10 хвилин знаходиться в проміжку 850-854 °С.

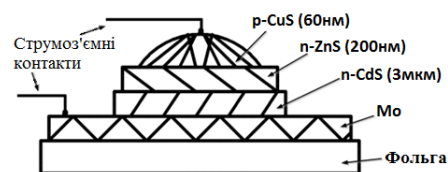


Рис.8. Схематичне зображення діодної гетероструктури foil-Mo-CdS-ZnS-CuS, над якою проводились описані дослідження на фото- та п'єзо-чутливість.

- Напилення CdS – камера знаходиться 39-40 хвилин при температурі напилення 780-783 °С.
- Охолодження камери. Мікропроцесорний модуль Tritan 6000 перетворює показники чотирьох термодатчиків і виводить їх на екран графіком температурно-часової залежності.

Із охолодженої установки отримуємо зібрану конструкцію вже із напиленими шарами ZnS і CdS на молібден, після чого вона відправляється в схожу за принципом роботи установку, де так само під високим вакуумом відбувається нанесення контактної бази.

В. Аналіз отриманих плівок

Дослідження проводились на власноруч розробленій для тонких плівок експериментальній установці із екрануючою кришкою-циліндром, покритою фольгою для захисту від зовнішнього освітлення. Фото установки показано на рис. 9. За допомогою комп'ютера та вольтметра знімались вольт-амперні характеристики кожного зразку при прикладанні фіксованого зовнішнього тиску різної величини на структуру спеціальним вузьким стержнем в 1 мм діаметром. Також додатково структуру скручували,

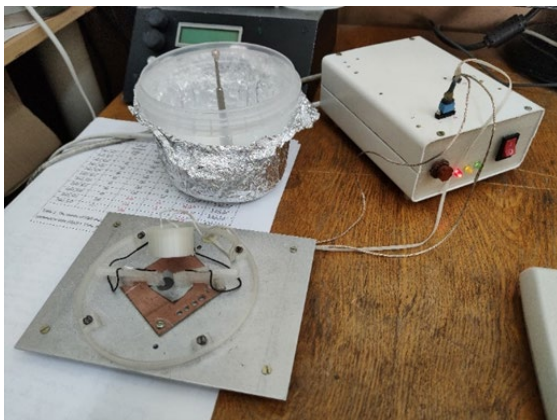


Рис.9. Фото розробленої експериментальної установки для дослідження тонких плівок.

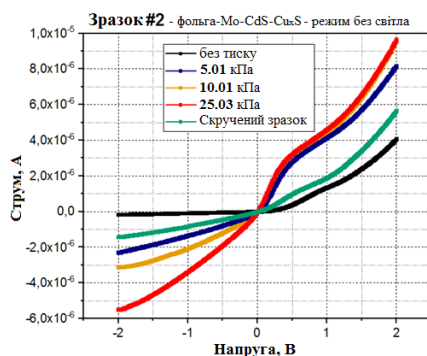


Рис.10. Вольт-амперна характеристика зразку №2 – фольга-Мо-CdS-CuS у режимі без світла (під екранованим ковпаком) при прикладанні різного тиску на структуру.

і піддавали освітленню. Результати показали (див. рис. 10 та рис. 11), що отримані структури є п'єзоелектричними та фоточутливими, а отже проявляють п'єзотронні та п'єзофототронні властивості.

Для отриманих груп тонких плівок було розраховано п'єзоелектричні коефіцієнти, зокрема і параметр e_{33} – п'єзоелектрична константа, яка є мірою коефіцієнта п'єзоелектричного заряду в напрямку, перпендикулярному до прикладеного електричного поля та паралельному напрямку поляризації; а також п'єзоелектричний параметр d_{33} , що описує деформацію, викликану прикладеним електричним полем. Для порівняння отриманих структур із іншими поширеними п'єзоматеріалами побудовано таблицю 1, де вказано значення параметрів e_{33} та d_{33} в не деформованому стані, без прикладеного тиску на структуру.

Далі було побудовано графіки залежностей п'єзоефективності e_{33} від величини прикладеного тиску – рис. 12. Як бачимо, при прикладанні тиску значення коефіцієнту росте, аналогічно до графіку залежності п'єзоефективності від тиску для вюрциту ZnS [40] на рис. 13. В нашому випадку значення вищі, що говорить про більш високу ефективність отриманих структур у порівнянні із вюрцитом ZnS, та про їх можливе використання у якості альтернативи.

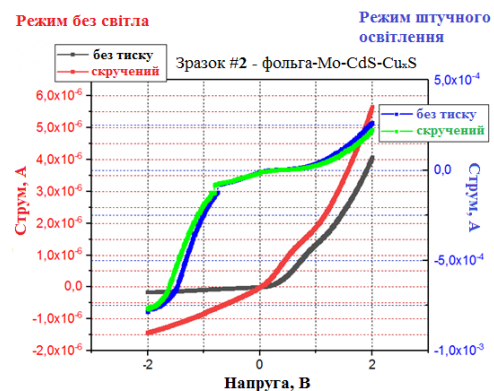


Рис.11. Вольт-амперна характеристика зразку №2 – фольга-Мо-CdS-CuS у двох різних умовах вимірювання: вісь струму зліва – без тиску на структуру та під час скручування у темноті; вісь струму справа – без тиску на структуру та під час скручування в режимі прикладеного штучного освітлення.

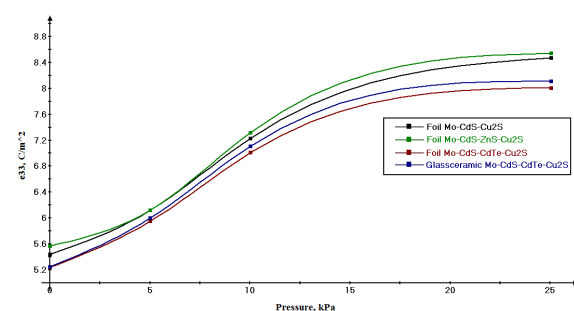


Рис.12. Графіки залежностей п'єзоефективності e_{33} від величини прикладеного тиску отриманих гетероструктур.



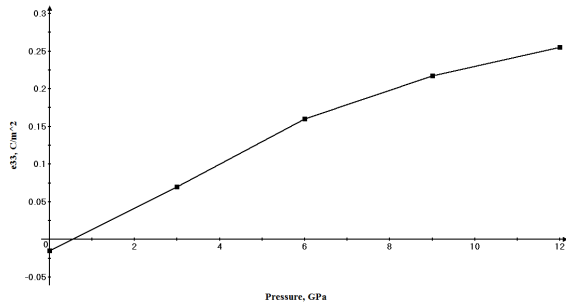


Рис.13. Графік залежності п'єзоефективного коефіцієнта e_{33} від тиску для вюрцити ZnS.

ТАБЛИЦЯ 1. П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ СТРУКТУР

	e_{33} , C/m ²	d_{33} , pm/V
Foil Mo-CdS-Cu ₂ S	5.44	447
Foil Mo-CdS-ZnS-Cu ₂ S	5.57	481
Foil Mo-CdS-CdTe-Cu ₂ S	5.24	473
Glassceramic Mo-CdS-CdTe-Cu ₂ S	5.25	474
Wurtzite ZnS[40]	0.34	5.9
ZnO[41]	1.32	5.9
AlN[41]	1.55	3.9
PZT[41]	23.3	60-130

С. Фізичні властивості створених структур

Загалом слід відзначити, що досліджені датчики тиску виконані на тонкоплівкових гетероперехідних структурах можуть бути використані замість розглянутих вище конструкцій, у яких використано лазер та зміна тиску викликає зміну фотоструму з діоду.

Застосування у галузі охорони здоров'я, автомобільного та технологічного управління вимагають точних вимірювань, які проводяться мініатюризованими датчиками, аби уникнути власного впливу датчика на результат, та вміння проводити вимірювання в точно визначених місцях і середовищах. Тут досліджені датчики можуть бути ефективними за рахунок простої технології виготовлення та дешевизни.

Проте досліджені сенсори не можна використовувати у медицині через токсичність матеріалів, хоча саме в цій сфері потреба у мініатюрних датчиках тиску сьогодні є вкрай актуальна. Розглянемо, наприклад, зондування коронарного артеріального тиску: для цього було запропоновано використання мініатюризованих мікроелектротехнічних систем (МЕМС) у вигляді сенсорів, включаючи використання оптичного відбиття та інтерферометрії, емнісних табличок та п'єзорезисторів. Для МЕМС датчиків п'єзорезистивне виявлення часто є кращим, ніж емнісне, через його меншу вартість, характеристики масштабування та можливість мати підсилювач, який відокремлено від датчика. Недоліками п'єзорезистивної методики виявлення є відносно низька чутливість та суттєво висока температура [20].

Загалом, головними технічними особливостями щодо виробництва та використання датчиків тиску на гетероперехідних діодах, є наступні.

1. Необхідність використання широкозонних напівпровідників, що дає можливість експлуатувати ці датчики при більш високих температурах порівняно з кремнієвими.
2. Не використовувати охолодження. У такому разі можна розробляти датчики для застосування в космічній апаратурі, чому сприяє його висока від'ємна температура та стійкість до радіації. Використання плівкових діодних гетеропереходів дає можливість зменшити загальну вагу датчика, а прибравши примусове охолодження можна ще й додатково зменшити загальну вагу пристрою вимірювання. Як результат такі сенсори можуть стати ефективним технічним рішенням для використання у космічній електронній апаратурі [39].

Пристрої на дорогих і складно одержуваних плівках нітридів структурно дуже схожі на досліджені плівки, які в свою чергу, виконані на значно дешевших матеріалах. Тому для розвитку космічної програми економічно та доцільно провести додаткові дослідження щодо розробки ефективних сенсорів на досліджених п'єзоелектричних плівках. Оскільки п'єзо ефект створює додатковий заряд у гетероструктурі на нітридах, а величина цього заряду залежить від концентрації алюмінію [39] — в проведених дослідженнях використано структури, в яких змінювали вагу порошку, що розпилюється, а також температури випаровування та час. Оскільки оперуючи цими параметрами можна змінювати склад плівки — відповідно, змінюється і концентрація хімічних елементів у кристалічній решітці. Таким чином можна знайти оптимальний склад для тих чи інших умов використання датчиків, для якої спостерігають максимальну ефективну зміну струму за зміни тиску, а відповідно і підібрати чутливість сенсору для визначеного динамічного діапазону. Тобто, можна зміну концентрації хімічних елементів у діодній структурі, можна підбирати параметри датчика згідно із особливостями його використання в електронній апаратурі.

ВИСНОВКИ

Незважаючи на те, що існує багато різноманітних конструкцій напівпровідникових датчиків тиску та їх конструктивні особливості, а також технології виготовлення, постійно удосконалюють, досліджені в межах виконання цієї роботи напівпровідникові датчики тиску мають певні переваги. Вони є простими, надійними, не потребують системи примусового охолодження та можуть бути використані в космічній електронній апаратурі. Зміна параметрів чутливості та динамічного діапазону датчиків через технологію їх

виготовлення та підбір відповідних значень концентрації хімічних елементів дозволяє застосовувати їх у різних сферах сучасного виробництва, у космічній електронній апаратурі та в дешевих побутових електронних пристроях. Розглянуті в роботі результати експериментальних досліджень та порівняльний аналіз

різних типів датчиків можуть бути цікавими для широкого кола фахівців, які займаються розробкою ефективних датчиків тисків та їх впровадженням у сучасній побутовій та промисловій електронній апаратурі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] P. S. Dhanaselvam, D. S. Kumar, V. N. Ramakrishnan, K. Ramkumar, and N. B. Balamurugan, "Pressure Sensors Using Si/ZnO Heterojunction Diode," *Silicon*, vol. 14, no. 8, pp. 4121–4127, 2022, DOI: [10.1007/s12633-021-01177-2](https://doi.org/10.1007/s12633-021-01177-2).
- [2] A. Baltakesmez, A. Yenisoy, S. Tüzemen, and E. Gür, "Effects of gold nanoparticles on the growth of ZnO thin films and p-Si/ZnO heterostructures," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 74, no. August 2017, pp. 249–254, 2018, DOI: [10.1016/j.mssp.2017.10.037](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.10.037).
- [3] Y. Lu *et al.*, "A boron and gallium co-doped ZnO intermediate layer for ZnO/Si heterojunction diodes," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 428, pp. 61–65, 2018, DOI: [10.1016/j.apsusc.2017.09.053](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.09.053).
- [4] J.-S. Park, H. Chae, H. K. Chung, and S. I. Lee, "Thin film encapsulation for flexible AM-OLED: a review," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 3, p. 034001, 2011, DOI: [10.1088/0268-1242/26/3/034001](https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/3/034001).
- [5] W. P. Eaton and J. H. Smith, "Micromachined pressure sensors: review and recent developments," *Smart Mater. Struct.*, vol. 6, no. 5, pp. 530–539, 1997, DOI: [10.1088/0964-1726/6/5/004](https://doi.org/10.1088/0964-1726/6/5/004).
- [6] Z. Xiong, H. Liu, and P. Zhu, "Lowering Power Consumption for Organic Light-Emitting Diodes Full-Screen Display," in *2022 19th China International Forum on Solid State Lighting & 2022 8th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLCHINA: IFWS)*, 2023, pp. 289–292, DOI: [10.1109/SSLChinaIFWS57942.2023.10071114](https://doi.org/10.1109/SSLChinaIFWS57942.2023.10071114).
- [7] D. Qiao, K. Li, N. Copner, Y. Gong, and G. Chen, "The enhanced light extraction top-emitting organic light-emitting diode based on metallic grating anode," in *2019 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO 2019 - Proceedings*, 2019, pp. 49–52, DOI: [10.1109/3M-NANO46308.2019.8947392](https://doi.org/10.1109/3M-NANO46308.2019.8947392).
- [8] Q. Li, J. Zhao, Y. Huang, W. Tang, and X. Guo, "Subthreshold-operated low-voltage organic field-effect transistor for ion-sensing system of high transduction sensitivity," *IEEE Sensors Lett.*, vol. 2, no. 4, p. 1, 2018, DOI: [10.1109/LSSENS.2018.2863228](https://doi.org/10.1109/LSSENS.2018.2863228).
- [9] D. Li *et al.*, "Polymer Electret Improves the Performance of the Oxygen-Doped Organic Field-Effect Transistors," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 41, no. 11, pp. 1665–1668, 2020, DOI: [10.1109/LED.2020.3026486](https://doi.org/10.1109/LED.2020.3026486).
- [10] P. K. Sinha, P. R. J. and A. Kumar, "Green Algae, Sunflower Seed and Reduced Graphene Oxide in Organic Photovoltaic Cell," *2018 Int. Conf. Power, Energy, Control Transm. Syst.*, pp. 136–138, 2018. DOI: [10.1109/ICPECTS.2018.8521621](https://doi.org/10.1109/ICPECTS.2018.8521621).
- [11] M. H. Hamza, N. M. Abdeltawab, S. Khalil, W. A. Omar, and T. M. Hatem, "Optimizing the Performance of Organic-Based Perovskite on Crystalline Silicon," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2020, vol. 2020-June, no. c, pp. 1476–1480, DOI: [10.1109/PVSC45281.2020.9300647](https://doi.org/10.1109/PVSC45281.2020.9300647).
- [12] L. Q. Cao, Z. He, W. E. I. Sha, and R. S. Chen, "Influence of Geometry of Metallic Nanoparticles on Absorption of Thin-Film Organic Solar Cells: A Critical Examination," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 145950–145959, 2020, DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3014817](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014817).
- [13] M. A. R. P. Mataraarachchi, S. J. N. P. Marthinu, H. J. Munasinghe, W. L. Abeygunasekara, and L. Samaranyake, "Numerical Modeling of Nano Structure Enhanced Organic Solar Cells for Better Optical Performance," in *2021 IEEE 16th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIS)*, 2021, pp. 330–335, DOI: [10.1109/ICIS53135.2021.9660633](https://doi.org/10.1109/ICIS53135.2021.9660633).
- [14] Y. Matsuda, K. Ueno, H. Yamaguchi, Y. Egami, and T. Niimi, "Organic Electroluminescent Sensor for Pressure Measurement," *Sensors*, vol. 12, no. 10, pp. 13899–13906, 2012, DOI: [10.3390/s121013899](https://doi.org/10.3390/s121013899).
- [15] Z. Ma, "An Electronic Second Skin," *Science (80-.)*, vol. 333, no. 6044, pp. 830–831, 2011, DOI: [10.1126/science.1209094](https://doi.org/10.1126/science.1209094).
- [16] C. Grossmann, U. Gawronski, F. Perske, G. Notni, and A. Tünnermann, "Optical system designs based on bi-directional sensor devices," 2012, p. 848706, DOI: [10.1117/12.928838](https://doi.org/10.1117/12.928838).
- [17] A. Martínez-Olmos, S. Capel-Cuevas, N. López-Ruiz, A. J. Palma, I. de Orbe, and L. F. Capitán-Vallvey, "Sensor array-based optical portable instrument for determination of pH," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 156, no. 2, pp. 840–848, 2011, DOI: [10.1016/j.snb.2011.02.052](https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.02.052).
- [18] D. Cheneler, M. Vervaeke, and H. Thienpont, "Light-modulating pressure sensor with integrated flexible organic light-emitting diode," *Appl. Opt.*, vol. 53, no. 13, p. 2766, 2014, DOI: [10.1364/AO.53.002766](https://doi.org/10.1364/AO.53.002766).
- [19] P. Melväs, E. Kälvesten, and G. Stemme, "Media protected surface micromachined leverage beam pressure sensor," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 11, no. 6, pp. 617–622, 2001, DOI: [10.1088/0960-1317/11/6/301](https://doi.org/10.1088/0960-1317/11/6/301).
- [20] P. Melvas and G. Stemme, "A diode-based two-wire solution for temperature-compensated piezoresistive pressure sensors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 50, no. 2, pp. 503–509, 2003, DOI: [10.1109/TED.2003.809026](https://doi.org/10.1109/TED.2003.809026).
- [21] K. R. Ram Victoria and S. Vasuki, "Simulation and Electrical Characterisation of P-Si/n-ZnO Based Heterojunction Diodes," *Proc. 2nd Int. Conf. Trends Electron. Informatics, ICOEI 2018*, no. Icoei, pp. 1494–1496, 2018, DOI: [10.1109/ICOEI.2018.8553927](https://doi.org/10.1109/ICOEI.2018.8553927).
- [22] A. Özmen, S. Aydoğan, and M. Yılmaz, "Fabrication of spray derived nanostructured n-ZnO/p-Si heterojunction diode and investigation of its response to dark and light," *Ceram. Int.*, vol. 45, no. 12, pp. 14794–14805, 2019, DOI: [10.1016/j.ceramint.2019.04.210](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.210).
- [23] O. Urper, O. Karacasu, H. Cimenoglu, and N. Baydoğan, "Annealing ambient effect on electrical properties of ZnO:Al/p-Si heterojunctions," *Superlattices Microstruct.*, vol. 125, no. August 2018, pp. 81–87, 2019, DOI: [10.1016/j.spmi.2018.10.027](https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.10.027).
- [24] S. K. Sharma, S. P. Singh, and D. Y. Kim, "Fabrication of the heterojunction diode from Y-doped ZnO thin films on p-Si substrates by sol-gel method," *Solid State Commun.*, 2018, DOI: [10.1016/j.ssc.2017.12.010](https://doi.org/10.1016/j.ssc.2017.12.010).
- [25] Ş. Karataş, H. M. El-Nasser, A. A. Al-Ghamdi, and F. Yakuphanoglu, "High Photoresponsivity Ru-doped ZnO/p-Si Heterojunction Diodes by the Sol-gel Method," *Silicon*, vol. 10, no. 2, pp. 651–658, 2018, DOI: [10.1007/s12633-016-9508-7](https://doi.org/10.1007/s12633-016-9508-7).
- [26] S.-Y. Tsai, M.-H. Hon, and Y.-M. Lu, "Fabrication of transparent p-NiO/n-ZnO heterojunction devices for ultraviolet photodetectors," *Solid State Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 37–41, 2011, DOI: [10.1016/j.sse.2011.04.019](https://doi.org/10.1016/j.sse.2011.04.019).
- [27] M. Guziejewicz *et al.*, "n-ZnO/p-4H-SiC diode: Structural, electrical, and photoresponse characteristics," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107, no. 10, p. 101105, 2015, DOI: [10.1063/1.4930307](https://doi.org/10.1063/1.4930307).
- [28] J. Huang, L. J. Wang, K. Tang, J. J. Zhang, Y. B. Xia, and X. G. Lu, "The fabrication and photoresponse of ZnO/diamond film heterojunction diode," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 258, no. 6, pp. 2010–2013, 2012, DOI: [10.1016/j.apsusc.2011.05.027](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.05.027).



- [29] F. Aksoy Akgul, G. Akgul, R. Turan, and H. Emrah Unalan, "All Solution-Based Fabrication of Copper Oxide Thin Film/Cobalt-Doped Zinc Oxide Nanowire Heterojunctions," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 99, no. 7, pp. 2497–2503, 2016, DOI: [10.1111/jace.14249](https://doi.org/10.1111/jace.14249).
- [30] M.-J. Chen, J.-R. Yang, and M. Shiojiri, "ZnO-based ultra-violet light emitting diodes and nanostructures fabricated by atomic layer deposition," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 7, p. 074005, 2012, DOI: [10.1088/0268-1242/27/7/074005](https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/7/074005).
- [31] D. Liu *et al.*, "High-Performance Ultraviolet Photodetector Based on Graphene Quantum Dots Decorated ZnO Nanorods/GaN Film Isotype Heterojunctions," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 13, no. 1, p. 261, 2018, DOI: [10.1186/s11671-018-2672-5](https://doi.org/10.1186/s11671-018-2672-5).
- [32] F. Djeflal, H. Ferhati, A. Benhaya, and A. Bendjerad, "Enhanced Photoresponse of Ultraviolet Photodetector via RF Sputtered ZnO/a-SiC Heterostructure," in *2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 2022, pp. 1039–1043, DOI: [10.1109/SSD54932.2022.9955668](https://doi.org/10.1109/SSD54932.2022.9955668).
- [33] S. Daimary and J. C. Dhar, "Ultrafast Photoresponse Using Axial n-ZnO/p-CuO Heterostructure Nanowires Array-Based Photodetectors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 69, no. 7, pp. 3768–3774, Jul. 2022, DOI: [10.1109/TED.2022.3175705](https://doi.org/10.1109/TED.2022.3175705).
- [34] A. P. Singh, R. K. Upadhyay, and S. Jit, "High-Performance Colloidal ZnO Quantum Dots/TIPS-Pentacene Heterojunction- Based Ultraviolet Photodetectors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 69, no. 6, pp. 3230–3235, Jun. 2022, DOI: [10.1109/TED.2022.3166120](https://doi.org/10.1109/TED.2022.3166120).
- [35] R. Singh, A. Srivastava, A. K. Dwivedi, and S. Tripathi, "Photoconductive and Photovoltaic Properties of Dual-Junction Thin-Film-Based Er-Doped ZnO/MoS₂/P-Si Heterostructure," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 69, no. 11, pp. 6171–6177, Nov. 2022, DOI: [10.1109/TED.2022.3206174](https://doi.org/10.1109/TED.2022.3206174).
- [36] R. Narzary, P. Phukan, and P. P. Sahu, "Efficiency Enhancement of Low-Cost Heterojunction Solar Cell by the Incorporation of Highly Conducting rGO Into ZnO Nanostructure," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 68, no. 7, pp. 3238–3245, Jul. 2021, DOI: [10.1109/TED.2021.3080228](https://doi.org/10.1109/TED.2021.3080228).
- [37] A. K. Dikshit, S. Maity, N. Mukherjee, and P. Chakrabarti, "Hybrid Inorganic-Organic Inverted Solar Cells with ZnO/ZnMgO Barrier Layer and Effective Organic Active Layer for Low Leakage Current, Enhanced Efficiency, and Reliability," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 11, no. 4, pp. 983–990, 2021, DOI: [10.1109/JPHOTOV.2021.3067828](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3067828).
- [38] J. A. Bahamonde and I. Kymissis, "A Reconfigurable Surface Acoustic Wave Filter on ZnO/AlGaIn/GaN Heterostructure," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 67, no. 10, pp. 4507–4514, 2020, DOI: [10.1109/TED.2020.3018697](https://doi.org/10.1109/TED.2020.3018697).
- [39] S. J. Pearton *et al.*, "GaN-based diodes and transistors for chemical, gas, biological and pressure sensing," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 16, no. 29, pp. R961–R994, 2004, DOI: [10.1088/0953-8984/16/29/R02](https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/29/R02).
- [40] S. Ferahtia, S. Saib, N. Bouarissa, and S. Benyettou, "Structural parameters, elastic properties and piezoelectric constants of wurtzite ZnS and ZnSe under pressure," *Superlattices Microstruct.*, vol. 67, pp. 88–96, 2014, DOI: [10.1016/j.spmi.2013.12.021](https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.12.021).
- [41] M. A. Fraga, H. Furlan, R. S. Pessoa, and M. Massi, "Wide bandgap semiconductor thin films for piezoelectric and piezoresistive MEMS sensors applied at high temperatures: An overview," *Microsyst. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 9–21, 2014, DOI: [10.1007/s00542-013-2029-z](https://doi.org/10.1007/s00542-013-2029-z).


Надійшла до редакції 25 січня 2023 року


Прийнята до друку 09 травня 2023 року




Microminiature Pressure Sensors Based on Diode Structures

V. A. Klymenko^f,  [0000-0002-6035-5511](https://orcid.org/0000-0002-6035-5511)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute"  [00syn5v21](https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.272760)
Kyiv, Ukraine

T. V. Semikina^s, PhD Senior Researcher,  [0000-0002-6182-4703](https://orcid.org/0000-0002-6182-4703)

V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine  [01qfgm256](https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.272760)
Kyiv, Ukraine

Abstract—The paper analyzes modern microminiature pressure sensors made on various diode structures, in particular on organic light-emitting diodes, field-effect transistors, photovoltaic elements and multi-circuit piezoresistive sensors. The possible areas of application of such sensors, their main advantages and disadvantages are shown. The study of 4 groups of samples of diode heterostructures based on CdS / ZnS / CuS / CdTe was carried out and the perspective of using pressure sensors based on these materials as an analogue of existing semiconductor devices was shown. On the basis of experimental studies with the application of pressure, twisting and illumination, it is substantiated that these structures are piezoelectric. The complete technological process of the step-by-step creation of these structures is presented. The obtained structures were analyzed: structural diagrams, current-voltage and piezoelectric characteristics in comparison with the characteristics of other piezoelectric materials are given. Possible areas of application of such structures are described. The provided design schemes and parameters of the obtained diode structures may be of interest to a wide range of specialists in the field of sensor technology and automation of various technological processes of microelectronic equipment manufacturing. It is shown that by changing the sensor manufacturing technologies and the concentration of chemical elements in the obtained films, it is possible to change the sensitivity of the sensor and the dynamic range of its operation, adapting the sensor parameters to the field of its application in the relevant measuring electronic equipment and pressure control systems.

Keywords — heterostructure; diode; pressure sensor; piezo effect; structural diagram; current-voltage characteristic; sensitivity; dynamic range.

