

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Факультет Електроніки
Кафедра мікроелектроніки

РЕФЕРАТ

з дисципліни: «Фізико - технологічні основи наноелектроніки-2»

Прилади на наноструктурованих п'єзоматеріалах

Виконавець:

Студент 4-го курсу

(підпис)

Лищенко Б. В.

Перевірив:

(підпис)

Орлов А. Т.

Зміст

1	Вступ	3
2	Експериментальні методи	4
3	Електричні характеристики приладів	7
4	Висновки	11

Розділ 1

Вступ

Величезна кількість п'єзоелектричних матеріалів було продемонстровано з часу відкриття п'єзоелектрики понад століття тому. Однак використання наноструктурованих п'єзоелектриків є відносно недавнім розвитком, і розуміння впливу нанорозмірного розміру на сегнето- та п'єзоелектрику все ще формується. Незважаючи на це, застосування п'єзоелектричних наноструктур для збору енергії швидко розширилося за останнє десятиліття, що призвело до величезного спектру зареєстрованих пристроїв. Більшість досліджень зосереджені на оксиді цинку, оскільки його наноструктури формуються відносно легко за допомогою низькотемпературних методів, на відміну від багатьох сегнетоелектриків, які вимагають високотемпературної обробки. Крім того, наноструктури кристалографічно вирівняні та не сегнетоелектричні, і тому не потребують полірування. Однак останнім часом інші добре відомі матеріали були досліджені для наноструктурованих накопичувачів енергії, включаючи титанат цирконату свинцю (PZT) і титанат барію, з потенціалом більш високої вихідної потужності через їх більш високі п'єзоелектричні коефіцієнти. У цьому огляді підсумовується робота над наноструктурованими п'єзоелектричними збирачами енергії, які зазвичай називають наногенераторами, починаючи з ранніх повідомлень про п'єзоелектричний вихід з одиничних напружених наностержнів ZnO і переходячи до використання масивів наностержнів, гнучких підкладок та альтернативних матеріалів і наноструктур. Узагальнено приклади, які були продемонстровані для пристроїв, і розглянуті майбутні перспективи цієї галузі.

Розділ 2

Експериментальні методи

Наностержень ZnO вирощували на 2×1 см оксиду індію-олова (ITO)- підкладки з поліетилентерефталату (ПЕТ) з покриттям (Aldrich) засіяний розпиленням ZnO (плівкою в 100 нм). Посіяні субстрати суспендують в розчинах 25 мМ нітрату цинку та 25 мМ гексаметилентетрамін і розігрівають до 90°C протягом 2,5 годин. Це процес повторювали загалом 6 разів у свіжих розчинах. ZnO з наностержнів виготовляли пристрої без подальшої обробки покриття полі(метилметакрилатом) (PMMA) або полі(3,4- етилендіокситіофен) полі(стиролсульфонат) (PEDOT:PSS). Три шари 10%-ного розчину ПММА (Aldrich, Mw 120 000) в анізолі (Sigma-Aldrich, 99%) наносили на нанострижні при 1000 об/хв протягом 30 секунд, сушили протягом 10 хвилин при 100°C після кожного шару. Два шари отриманого PEDOT:PSS були нанесені на нанострижні при 2000 об/хв протягом 30 секунд з десятихвилинним сушінням при 100°C після кожного шару. Усі пристрої були закінчені випарюванням золоті контакти на верхній поверхні PMMA або PEDOT:PSS за допомогою термічного випаровування 99,99+% золотого дроту (Goodfellows). Плоскі мідні стрічки були приклеєні як до шару ITO, так і до золота контакт за допомогою срібного DAG, а потім епоксидної смоли на одному кінці пристрою (як показано на рис. 2.1e), який був затиснутий для випробування. Сканування електронно-мікроскопічні (SEM) мікрофотографії наностержнів ZnO були записано за допомогою FEI Inspect-F SFEG SEM.

Ефективність збору кінетичної енергії вимірювали за допомогою монтажу приладів на товщину 0,5 мм, 6 ПЕТ 2,5 см підкладки та згинання за допомогою кулачка, прикріпленого до двигуна обертаються з частотою 1–3 Гц так, щоб кінчик

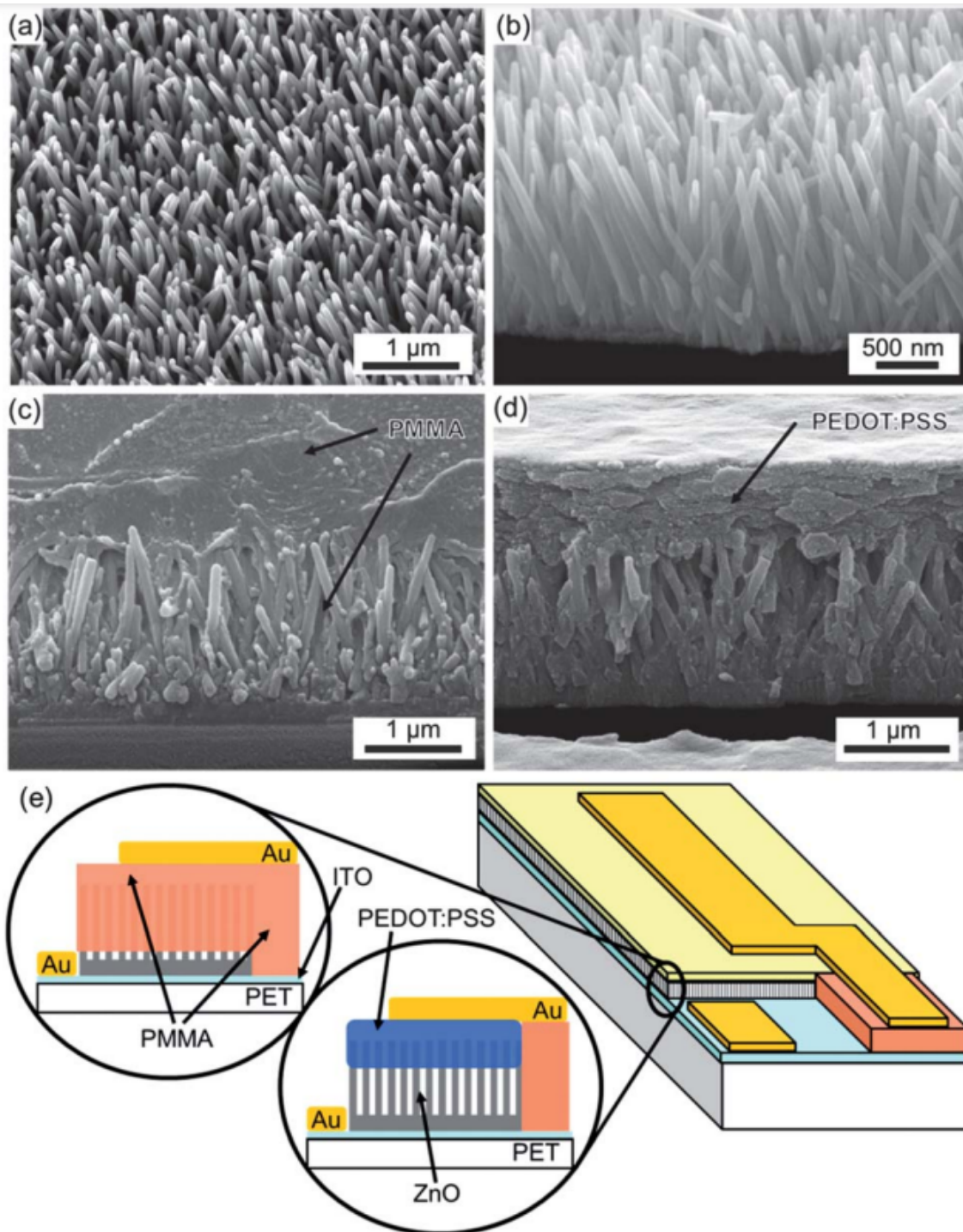


Рис. 2.1: Мікрофотографії та схеми SEM без покриття та з полімерним покриттям ZnO наностержнів, використаних у дослідженні. (а) 30 нахил наностержнів ZnO без покриття. (б) Перетин наностержнів ZnO. (с) Поперечний переріз наностержнів ZnO, покритих ПММА. ПММА заповнює між наностержнями до основи і покриває їх на 3,5 мм. Верхня частина шар ПММА обрізається на зображенні, щоб показати деталі заповнення. (д) Поперечний переріз PEDOT: наностержні ZnO з покриттям PSS. PEDOT:PSS покриває лише кінчики і покриває їх нанострижні на 1 мм. (е) Схема конструкції пристрою з поперечними перерізами ПММА та пристрої, що показують різне наповнення, як показано в (с) і (д).

підкладки був протилежний контактам був зігнутий на 10 мм і повертався один раз за цикл. За допомогою камери можна було підтримувати постійне максимальне зміщення пристрою, змінюючи частоту деформації. Наведені результати для швидкостей деформації 1 Гц, якщо не вказано інше. Профіль зміщення руху вимірювали за допомогою MEL Лазерний тріангуляційний датчик М5. Швидкість обчислювалася з вимірювання зміщення, що залежать від часу. Напруга, створювана пристроями, була вловлена в розімкненому ланцюзі за допомогою Осцилограф Tektronix TDS2012C в режимі запуску та з використанням National Instruments PXIe-1062Q з підтримкою NI DAQ в діапазоні навантажень, змінених за допомогою програмованого М-602 десятиліття стійкості (MEATEST). виправлено опір навантаження вхідний опір вимірювання 1 MU. DC-вольтамперні характеристики вимірювали за допомогою Keithley 2400 SMU в поєднанні з NI Labview. Опір пристроїв PMMA і PEDOT:PSS вимірювали за допомогою Agilent 4294A Аналізатор імпедансу. Діапазон вхідних частот становив 40 Гц до 10 МГц.

Розділ 3

Електричні характеристики приладів

Вимірювання електричних властивостей, таких як струм- Напруга ($I-V$), ємність-напруга ($C-V$) та спектроскопія імпедансу можуть дати цінне уявлення про продуктивність пристрою та його зв'язок із структурою та механізмом перетворення енергії. Такі вимірювання дають корисну інформацію про внутрішній опір, ємність і випрямлення поведінку пристроїв.

Поведінка постійного струму-густина-напруга ($J-V$) Пристрої ZnO/PMMA та

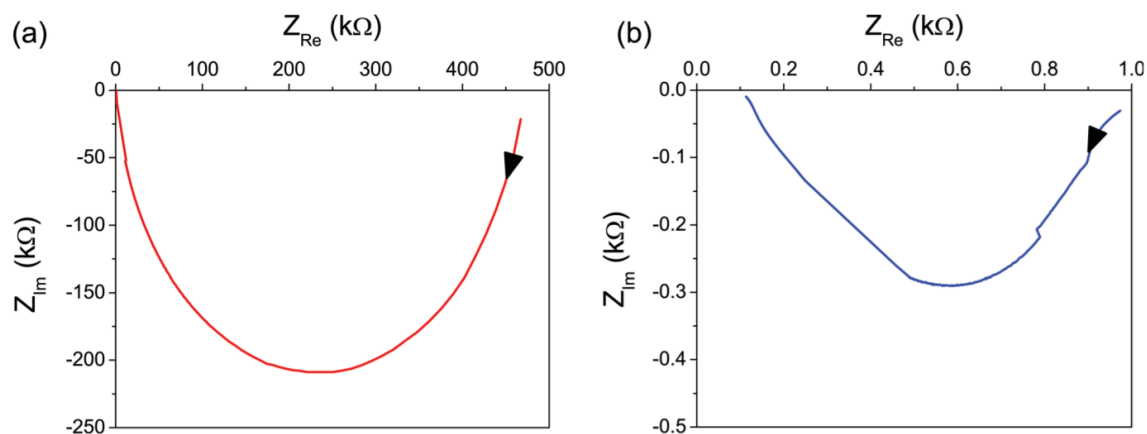


Рис. 3.1: Графіки Найквіста для пристроїв ZnO/PMMA (a) і ZnO/PEDOT:PSS (b), що показують реальні та уявні компоненти імпедансу (Z), виміряні між 40 Гц і 10 МГц. Стрілки позначають напрямок збільшення частоти. Приблизні значення внутрішнього опору та ємності, отримані з аналізу графіків, припускаючи а Проста RC схема наведена в таблиці 1.)

ZnO/PEDOT:PSS показані на рис. 3.1. Структура ZnO/PMMA (рис. 3.1a) демонструє нелінійну поведінку с високий опір 1,48 МОм при низькій напрузі і пробою

до набагато нижчого опору близько 530 Ом вище $\pm 1-2$ В. ZnO/ PEDOT:PSS поводить ся як неідеальний р–п-перехід, тобто очікується, оскільки вирощений ZnO має п-тип, а PEDOT:PSS – р-тип. Для ZnO/PEDOT:PSS з використанням неідеального рівняння діода⁴⁰ з опором послідовно і паралельно (шунт) діоду, послідовний (R_s) і шунтовий (R_{sh}) опір можна оцінити з поведінки струму навантаження при високому прямому струмі і при зворотному насиченні відповідно. Це дає $R_s = 165$ Ом та $R_{sh} = 1,55$ КОм для діода ZnO/PEDOT:PSS. Графіки Найквіста, що показують частотно-залежну реактивність імпеданс (Z_{Im}) і частотно-незалежний резистивний опір (Z_{Re}) для пристроїв ZnO/PMMA і ZnO/PEDOT:PSS є показано на рис. 3.2 зі стрілками, що позначають зростання частоти вимірювання від 40 Гц до 10 МГц. Чисто негативний уявний імпеданс вказує, що реактивна складова є ємнісною. Тому для наближення резистивних і ємнісних властивостей приладів був проведений аналіз виконується за умови простої RC-схеми.⁴¹ У цьому випадку внутрішній опір можна приблизно визначити з діаметра кривої вздовж осі, що позначає дійсну складову імпеданс (Z_{Re}), оскільки на низькій частоті імпеданс RC є суто резистивний. Це дає значення внутрішнього опору (Z_{int}). приблизно 475 КоМ для пристрою PMMA і 1 КоМ для пристрою Пристрій PEDOT:PSS. Це відповідає вищому опору значення, отримані із співвідношення струм-напруга для Пристрій ПММА. Крім того, внутрішній опір для обох приладів дуже близькі до значень оптимальних опорів навантаження, що очікується, оскільки внутрішній опір визначає оптимальний опір навантаження.

Для RC-ланцюга Z_{Im} знаходиться на максимумі на відсіченні або критичній частоті, f_c , що становить 980 Гц для PMMA і 6,7 кГц для PEDOT:PSS. На цій частоті:

$$RC = \frac{1}{2 \cdot \pi f_c}$$

З цього можна розрахувати внутрішню ємність, C_{int} , що становить 0,32 нФ для пристрою PMMA і 24 нФ для PEDOT:PSS. Це наближення, ймовірно, буде більш точним для пристрою PMMA, оскільки він більше слідує поведінці RC де ємнісний реактивний опір $X_c = R_{int}/2$ при f_c , тоді як для PEDOT:PSS X_c ближче до $R_{int}/4$ у f_c . Хоча це тільки приблизні значення, нижня ємність для пристрою PMMA буде забезпечувати менше потужності реактивному навантаженню, оскільки це пропорційно ємності. Ці графіки імпедансу можуть забезпечити набагато важли-

вішу інформацію про деякі складності електричних характеристик цих пристроїв через більше поглиблений аналіз і налагодження більш складних схем моделі. Це триває і має на меті забезпечити повне розуміння принципів роботи приладів.

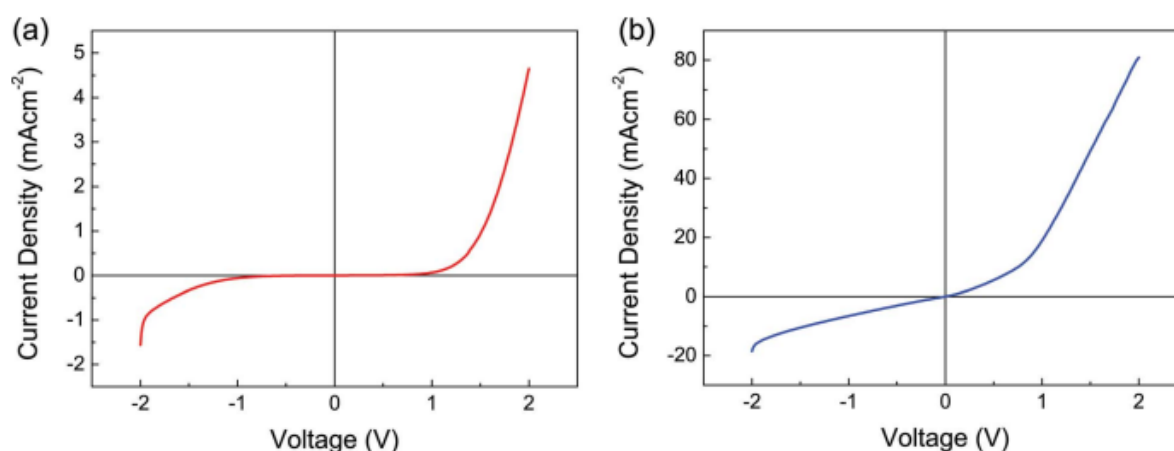


Рис. 3.2: Характеристики густини струму та напруги пристроїв ZnO/PMMA (a) та ZnO/PEDOT:PSS (б)

Цей аналіз демонструє, що розуміння Вихід, що залежить від навантаження, можна отримати в порівнянні з електричними властивостями самих приладів. Це демонструє, що високий внутрішній резистивний опір пристрою PMMA призводить до того, що він відповідає очікуваному високому опорі навантаження, і тому дає низьку вихідну потужність порівняно з пристроями PEDOT:PSS, незважаючи на дещо вищу напругу розімкнутого ланцюга. Різна ємність двох пристроїв також вказує на те, що порівняння виходів пристрою в діапазоні ємнісних навантажень доповнить розуміння, отримане від резистивних узгоджених навантажень та дозволить більш повно зрозуміти їх поведінку при використанні в програмах для збирання енергії.

Хоча менша внутрішня ємність ПММА пристрою може призвести до меншої передачі енергії, якщо використовувалося б реактивне навантаження, як зазначалося вище, таке порівняння є складним і вимагатиме використання нелінійних елементів, таких як випрямляч або d.c. до d.c. конвертер і залежатиме від таких факторів, як робочий цикл програми, напр. датчик/передавач. тому продуктивність в умовах реального навантаження, ймовірно, буде складною і сильно залежить від застосування, але є важливою для оцінити продуктивність програми, і, отже, є важлива тема подальших досліджень. Крім того, різноманітні частотно-

залежна поведінка вказує на те, що аналіз частотно-залежного вихідного сигналу буде додатково сприяти повній характеристикі пристрою. Нарешті, з розумінням принципу роботи цих пристроїв отриманих за допомогою еквівалентної схеми моделювання, керівництво для проектування таких пристроїв може бути спрямовано для оптимальної більшої продуктивності.

Розділ 4

Висновки

Нові конструкції та матеріали пристроїв для збирання п'єзоелектричної енергії пропонують багато потенційних переваг, але є й деякі проблемні виклики для їх тестування. Пристрої з використанням п'єзоелектриків (кераміка) розробляється більше 15 років, і таким чином було створено широкий спектр процедур поглибленого тестування. Таким чином, існує велика потенційна вигода для наноструктурованого п'єзоелектричного збору енергії (наногенераторів) для використання цього методу тестування. На сьогоднішній день наногенератори мають майже виключно характеризується лише розімкнутим ланцюгом вимірювання напруги (V_{oc}) або струму короткого замикання (I_{sc}). Порівнюючи два прилади ZnO/полімер, ми показали, що таке міри, і особливо значення потужності, розраховані з добутку їх амплітуд, є недостатньою метрикою для порівняння різних архітектур пристроїв. Це було показано що вихідна потужність вимірюється в діапазоні резистивних навантажень необхідних для встановлення пікової вихідної потужності. Корисно також поділити це на площу або об'єм пристрою, щоб обчислити щільність потужності. Таким чином, незважаючи на вищий V_{oc} 252 мВ, ZnO/PMMA пристрій має максимальну миттєву щільність потужності лише 0,243 мВт см² порівняно з V_{oc} 90 мВ, а щільність потужності 36 мВт см² для пристрою ZnO/PEDOT:PSS. Такі залежні від навантаження.

Вихідна потужність від добутку напруги і струму критично залежить від швидкості застосування механічного деформації, навіть для ідеального п'єзоелектрика, тому важливо, щоб вимірювання здатності пристрою видавати енергію протягом певного періоду в часі. У цій статті ми повідомляється про вимірювання енергії за

кожен цикл, який був розрахований шляхом інтегрування переданої потужності до навантаження протягом усього циклу. Це було розраховано як $0,22 \text{ нДж см}^2$ і $38,6 \text{ нДж см}^2$ для ZnO/PMMA. Крім того, поточні сигнали передані на навантаження або конденсатор можуть бути інтегровані з часом до обчислення загального заряду, який створює пристрій. Крім того, для безперервного циклу вимірювань обчислення середньої потужності може бути корисною для визначення потенціалу безперервної дії вихідної потужності. Це також тут розраховується, але дуже залежить на вибрану тривалість, протягом якої буде здійснюватися усереднення для типу імпульсу. Тому корисно дещо виміряти форму інтегрованого за часом або усередненого результату, а також надати характеристики входу, такі як максимальне переміщення, швидкість, прискорення або частота.

Крім вимірювання потужності пристроїв через навантаження, було показано, що електрична характеристика приладів дозволяють зрозуміти їхню відносну поведінку. Отже, вимірювання струм-напруга та Спектри імпедансу були виконані для встановлення внутрішнього опору приладів. Використання простої RC-схеми модель для даних приблизних значень внутрішнього опору були прилади PMMA і PEDOT:PSS на 475 КоМ та 1 КоМ розраховані, які дуже близькі до оптимальних опорів навантаження кожного пристрою. Внутрішня ємність була оцінена як $0,32 \text{ нФ}$ і 24 нФ для пристроїв PMMA і PEDOT:PSS відповідно.

При такому рівні характеристики приладів так і повинно бути можливо не тільки порівняти їх з іншими видами заготівлі енергії, а й для подальшого розвитку нашого розуміння про їх поведінку, що веде до покращення дизайну як макро, так і нанорозмірні. Наприклад, довгострокове випробування на стабільність і втому можна було б вивчати, щоб визначити, як поредінка пристроя може змінюватися з часом і в процесі використання. Крім того, далі характеристика їхніх внутрішніх властивостей могла б дозволити розробити точні моделі еквівалентних схем, які б полегшити їх інтеграцію в оптимізований збір енергії схеми. Хоча ми підкреслювали важливість виходу вимірювання резистивних навантажень, це також було б корисно в майбутньому, щоб охарактеризувати вихід через ємнісні навантаження і потенційно складніші схеми збирання, оскільки це також буде сильно залежати від електричних характеристик приладів. За допомогою двох протестованих тут пристроїв на одній підкладці розмірами, матеріалом і структу-

рою, а також використанням того ж штаму швидкість і амплітуда, представлені вимірювання дозволяють безпосередньо зробити порівняння продуктивності та властивостей. Однак вважали що треба мати конструктивні варіації пристроїв такі як товщина підкладки, положення нейтральної осі с щодо активного шару та довжини та співвідношення сторін консоль, ймовірно, буде значно відрізнятися для пристроїв, вироблених у іншій лабораторії. Це, а також різні методи проціджування ймовірно, вплине на вимірний вихід. Однак, методи тестування, продемонстровані тут, забезпечують покращені можливості порівняти вихідні пристроїв, їх виготовлених і протестовану різну техніку.

Список використаної літератури

- [1] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes and T. C. Green, Proc. IEEE, 2008, 96, 1457–1486.
- [2] V. F. Lvovich, Impedance Spectroscopy, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2012.
- [3] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285514002663>
- [4] <https://www.springerprofessional.de/nanostructured-piezoelectric-energy-harvesters/2223256>
- [5] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/advs.202100864>
- [6] S. M. Sze and K. K. Ng, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley and Sons, New Jersey, 2007.