

Л. В. ЗАЙЦЕВА, А. І. ДОБРОЖАН, Г. С. ХРИПУНОВ, М. С. ХРИПУНОВ

ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАЗОВОЇ ПЛІВКОВОЇ ГЕТЕРОСИСТЕМИ Al/ITO/POLYIMIDE/Al₂O₃ ЄМНІСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

На основі проведених структурних досліджень тонких плівок було розроблено конструктивно-технологічне рішення та створено тонкоплівковий ємнісний перетворювач для проведення акустичного контролю металевих виробів ємнісним способом. Визначено, що поряд із кристалічною структурою шарів, необхідно також контролювати поверхневий електричний опір провідного шару ІТО, значення якого визначають можливість використання такої структури у якості обкладки ємнісного перетворювача без значних втрат корисного сигналу, та діелектричну проникність шару Al₂O₃, котра суттєво впливає саме на величину корисного сигналу. За допомогою чотирьохзондового методу встановлено, що поверхневий електроопір (R_{\square}) шарів ІТО при оптимальних режимах осадження дорівнює 8-15 Ом/□. Дослідження електрорушійної сили Холла свідчать про те, що одержане значення питомого електроопору зумовлене концентрацією основних носіїв заряду від близько $8,3 \cdot 10^{20}$ см⁻³ та рухливістю основних носіїв заряду на рівні 44 см²/(В·с). Результати досліджень діелектричних властивостей свідчать про зростання величини діелектричної проникності структури поліімід/Al₂O₃, котра складає 8,5–11,5 відн. од., відносно поліімідної плівки (3–3,9 відн. од.) приблизно у 3 рази при частотах збуджуючого сигналу у діапазоні 10 Гц–10 МГц. Зазначена обставина підтверджує припущення щодо можливості збільшення діелектричної проникності прошарку за рахунок нанесення на поліімідну плівку тонкого шару Al₂O₃. Для підтвердження можливості збільшення чутливості методу за рахунок використання ємнісного перетворювача на основі структури Al/ITO/поліімід/Al₂O₃ у порівняння з класичними перетворювачами було проведено дослідження серії зразків із алюмінію на частоті коливань 2,5 МГц. Величина прийнятого сигналу у разі використання тонкоплівкового перетворювача зростає у 7,6 рази у порівнянні з класичним перетворювачем, що добре корелює з проведеними вимірюваннями діелектричної проникності діелектричних шарів та з урахуванням зменшення товщини діелектричного прошарку. Таким чином, експериментально підтверджується зростання чутливості ємнісного методу у разі використання тонкоплівкових ємнісних перетворювачів на основі структури Al/ITO/поліімід/Al₂O₃. Максимальна амплітуда акустичного зміщення припадає на край пластини, тому були проведені дослідження електродів з вирізами, що дало змогу підвищити акустичний сигнал вдвічі для великого внутрішнього вирізу.

Ключові слова: дефектоскопія, ємнісний перетворювач, тонкі плівки, ІТО, поліімід, ефективність.

L. V. ZAYTSEVA, A. I. DOBROZHAN, G. S. KHRYPUNOV, M. S. KHRYPUNOV

ELECTRICAL PROPERTIES OF THE BASE FILM HETEROSYSTEM Al/ITO/POLYIMIDE/Al₂O₃ FOR CAPACITIVE CONVERTER

On the basis of the conducted structural studies of thin films, a structural and technological solution was developed and a thin film capacitive transducer was created for acoustic monitoring of metal products by a capacitive method. It was determined that along with the crystalline structure of the layers, it is also necessary to control the surface electrical resistance of the conductive ITO layer, the values of which determine the possibility of using such a structure as a coating of a capacitive converter without significant losses of the useful signal, and the dielectric permeability of the Al₂O₃ layer, which significantly affects the value of the useful signal. With the help of the four-probe method, it was established that the surface electrical resistance (R_{\square}) of ITO layers under optimal deposition conditions is equal to 8–15 Ohm/□. The study of electric power Hall results indicate that the obtained value of specific electrical resistance is determined by the concentration of the main charge carriers from about $8.3 \cdot 10^{20}$ cm⁻³ and the mobility of the main charge carriers at the level of 44 cm²/(V·s). The results of studies of dielectric properties indicate an increase in the value of the dielectric constant of the polyimide/Al₂O₃ structure, which is 8.5–11.5 relative to units, relative to the polyimide film (3–3.9 relative units) by approximately 3 times at frequencies of the exciting signal in the range of 10 Hz–10 MHz. This fact confirms the assumption about the possibility of increasing the dielectric constant of the interlayer due to the application of a thin layer of Al₂O₃ on the polyimide film. To confirm the possibility of increasing the sensitivity of the method due to the use of a capacitive transducer based on the Al/ITO/polyimide/Al₂O₃ structure, in comparison with classical transducers, a series of aluminium samples was studied at an oscillation frequency of 2.5 MHz. The value of the received signal when using a thin-film converter increases by 7.6 times compared to a classic converter, which correlates well with the measurements of dielectric permeability of dielectric layers and taking into account the decrease in the thickness of the dielectric layer. Thus, the increase in the sensitivity of the capacitive method in the case of using thin-film capacitive converters based on the Al/ITO/polyimide/Al₂O₃ structure is experimentally confirmed. The maximum amplitude of the acoustic displacement occurs at the edge of the plate, so studies were conducted on electrodes with cutouts, which made it possible to increase the acoustic signal twice for a large internal cutout.

Keywords: defectoscopy, capacitive transducer, thin films, ITO, polyimide, efficiency.

Вступ. Необхідність спрощення технологій контролю макродефектів металевих виробів в умовах промислового виробництва зумовило подальший розвиток широко запроваджених акустичних методів [1]. Їх основу складають п'єзоелектричні прилади, що реалізують акустичний метод з використанням спеціальних рідин для забезпечення необхідного акустичного контакту [2]. Значний досвід практичного використання цього методу визначив області, в яких він не є ефективним [3, 4]. Так неможливо використовувати рідину для акустичного контролю виробів із забрудненою поверхнею, уражених

корозією, або з покриттями (фарба, полімерні плівки й інші ізоляційні покриття), гарячих і холодних виробів. Застосування рідини перешкоджає зниженню експлуатаційних витрат та проведенню високошвидкісного контролю. Таким чином для потреб практичної дефектоскопії необхідно створити прилади, які дадуть можливість проводити безрідинний акустичний контроль [2]. Перспективними серед таких приладів можуть бути засоби, створені на основі ємнісного способу генерації та прийому акустичних сигналів [2, 4], який має принципово інший фізичний механізм генерації

© Л. В. Зайцева, А. І. Доброжан, Г. С. Хрипунів, М. С. Хрипунів, 2022

акустичного сигналу у об'єкті контролю (ОК), поверхня його є однією з обкладок емнісної композиції та сама генерує сигнал без необхідності застосування рідини для забезпечення акустичного контакту. Однак на сьогодні відсутня теорія емнісного акустичного методу, щодо генерації, розповсюдження та прийому акустичних хвиль в металевих середовищах, а також відсутні сучасні емнісні перетворювачі (ЄП), розробці яких приділялося недостатньо уваги. На теперішній час потенційна перспективність у розвитку ЄП полягає у можливості їх створення на основі тонких плівок провідних і діелектричних матеріалів [5, 6], використання яких підвищить ефективність ЄП до сучасного рівня п'єзоелектричних перетворювачів. Таким чином, створення і дослідження плівкових гетеросистем ЄП є актуальними.

Мета статті. Створення і дослідження плівкових гетеросистем емнісних перетворювачів на основі гетеросистеми Al/ITO/поліімід/Al₂O₃ з метою підвищення чутливості акустичного методу неруйнівного контролю металів.

Виготовлення та дослідження електричних властивостей тонкоплівкового ЄП на основі структури Al/ITO/polyimide/Al₂O₃. На основі проведених у [7] структурних досліджень тонких плівок було розроблено конструктивно-технологічне рішення тонкоплівкового ЄП для проведення акустичного контролю металевих виробів емнісним способом. Основні технологічні етапи виготовлення такого приладу полягають у наступному.

При створенні ЄП був використаний поліімід марки Urelex-S (товщина полііміду – 15 мкм), поверхня якого була заздалегідь очищена. На наступному етапі з однієї сторони полііміду методом нереактивного магнетронного розпилення на вакуумній установці ВУП-5М в наступних технологічних умовах було отримано шар ITO: довжина розрядного проміжку – 70 мм; час осадження – 30 хвилин; початковий залишковий тиск у вакуумній камері складав $3 \cdot 10^{-7}$ Па і робочий тиск в процесі розпилення мішені – $1,5 \cdot 10^{-4}$ Па; мішень ITO складалась з 90 вес. % In₂O₃ та 10 вес. % SnO₂ і пресувалась під тиском приблизно 12 кг/см²; температура підкладки складала 300 °С, питома потужність магнетрону 0,28 Вт/см² [8]. З іншої сторони плівки полііміду в аналогічних технологічних умовах було отримано шар Al₂O₃. Останньою операцією у технологічному циклі виготовлення ЄП було створення методом термічного резистивного розпилення на вакуумній установці ВУП-4 в наступних технологічних умовах струмопровідних доріжок із алюмінію на поверхню шару ITO: напилювання проводилося через відповідну маску при вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ Па, підкладка при напилюванні нагрівалася до 110 °С, час напилювання із вольфрамівих випарників складав 120 с.

Схематичне зображення перерізу такого приладу наведено на рис. 1. За наведеною технологією було створено дослідний зразок тонкоплівкового ЄП для акустичного контролю металевих виробів.

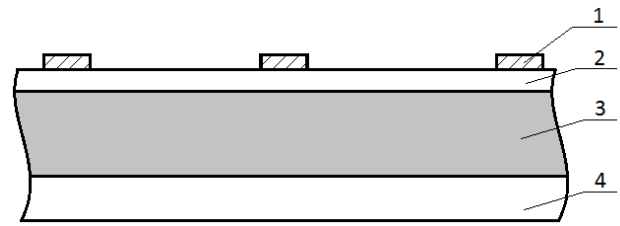


Рисунок 1 – Схематичне зображення перерізу запропонованого тонкоплівкового ЄП:
1 – алюмінієві струмопровідні доріжки;
2 – шар ITO завтовшки 0,2–0,3 мкм;
3 – поліімідна плівка завтовшки 15 мкм;
4 – шар Al₂O₃ завтовшки 0,5–1 мкм

Як вже зазначалося у [7], чутливість ЄП в режимі прийому залежить від діелектричної проникності прошарку між електродам ЄП і ОК. У зв'язку з цим, для проведення високочутливого акустичного контролю емнісним методом необхідно контролювати величину цього параметру. З цією метою було проведено дослідження залежності діелектричної проникності ε поліімідної плівки від частоти збуджуючого сигналу [9].

У разі твердих діелектриків вимірювання ε найчастіше проводиться шляхом вимірювання ємності C плоского електричного конденсатора між електродами якого розміщено діелектрик, що досліджується. Величина діелектричної проникності за отриманою величиною ємності визначається за співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{h}{\varepsilon_0 S} C, \quad (1)$$

де ε_0 – діелектрична постійна;

S – площа обкладки;

h – відстань між обкладками конденсатора.

Дослідження діелектричної проникності поліімідної плівки було проведено для частот збуджуючих сигналів у діапазоні 10–10⁷ Гц, які генерувалися за допомогою генератора сигналів типу ГСС-20. Величина ємності конденсаторної структури вимірювалася за допомогою RLC-метру типу E318. У якості електричних обкладок конденсаторної структури використовувалися шліфовані металеві пластини з розмірами 50 × 50 мм. Залежність розрахованої за ємністю величини діелектричної проникності поліімідної плівки наведено на рис. 2.

Наведена залежність свідчить про несуттєву зміну величини діелектричної проникності полііміду у діапазоні 3–4 відн. од. при частотах збуджуючого сигналу у діапазоні 10 Гц–10 МГц, що дозволяє використовувати поліімідну плівку як діелектричний прошарок при емнісному контролі металевих виробів з широким діапазоном частот збуджуючого сигналу.

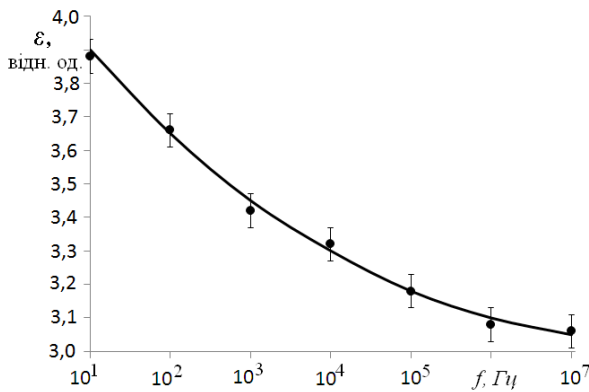


Рисунок 2 – Залежність діелектричної проникності поліімідної плівки від частоти збуджуючого сигналу

Виходячи з експериментальних даних, щодо залежності величини діелектричної проникності ε поліімїду від частоти збуджуючого сигналу, можна бачити, що величина ε майже не змінюється у діапазоні частот 10 Гц–10 МГц та залишається на рівні 3–4 відн. од. Така величина ε хоч і є достатньою для використання шару у ЄП, але є замалою для отримання максимально можливої чутливості таких перетворювачів. Для підвищення величини діелектричної проникності діелектричного прошарку ЄП було запропоновано використання додаткового шару з Al₂O₃ [8, 10]. Корунд має діелектричну проникність на рівні 11 відн. од., що майже у 3 рази більше за поліімїд і має у 3 рази збільшити чутливість такого ЄП.

Два шари діелектрика у разі їх використання у тонкоплівковому ЄП представляють собою еквівалент послідовно з'єднаних конденсаторів. Спираючись на добре відоме співвідношення для послідовного з'єднання конденсаторів

$$C_{\Sigma} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (2)$$

та співвідношення для ємності конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \quad (3)$$

де S – площа обкладок конденсатора;

d – товщина діелектричного прошарку,

ε₀ – діелектрична постійна;

можна записати співвідношення для сумарної ємності двошарової структури:

$$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 S}{\varepsilon_1 d_1 + \varepsilon_2 d_2}, \quad (4)$$

де ε₁ та ε₂ – діелектричні проникності обох шарів структури, d₁ та d₂ – товщини діелектричних шарів.

Згідно до співвідношення (4) з метою визначення впливу додаткового шару Al₂O₃ на загальну ємність діелектричного прошарку було проведено розрахунок відношення ємності двошарової структури поліімїд/Al₂O₃ (з товщинами шарів 15 мкм та 1 мкм, відповідно) до ємності поліімїду (завтовшки 15 мкм):

$$\frac{C_{\Sigma}}{C_{II}} = \frac{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 S}{\varepsilon_1 d_1 + \varepsilon_2 d_2}}{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{d_1}} = \frac{\varepsilon_2 d_1}{\varepsilon_1 d_1 + \varepsilon_2 d_2},$$

$$\frac{C_{\Sigma}}{C_{II}} = \frac{10 \cdot 15 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 15 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-6}} = 2,72. \quad (5)$$

Тобто нанесення на поліімїд тонкого шару Al₂O₃ повинно збільшити ємність двошарової структури майже у три рази, що у свою чергу призведе до аналогічного зростання величини корисного сигналу ЄП і до покращення чутливості методу в цілому [11].

Дослідження діелектричної проникності гетероструктури поліімїд/Al₂O₃ було проведено для частот збуджуючих сигналів у діапазоні 10–10⁷ Гц. У якості електричних обкладок конденсаторної структури використовувалися шліфовані металеві пластини з розмірами 50 × 50 мм. Залежність розрахованої за ємністю величини діелектричної проникності гетероструктури поліімїд/Al₂O₃ у порівнянні з поліімїдом наведено на рис. 3.

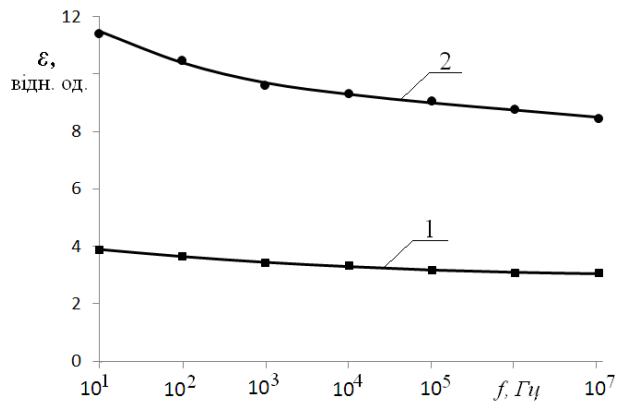


Рисунок 3 – Залежність діелектричної проникності поліімїду (1) та гетероструктури поліімїд/Al₂O₃ (2) від частоти збуджуючого сигналу

Наведена залежність свідчить про зростання величини діелектричної проникності гетероструктури поліімїд/Al₂O₃, котра складає 8,5–11,5 відн. од., відносно поліімїдної плівки приблизно у 3 рази при частотах збуджуючого сигналу у діапазоні 10 Гц–10 МГц, що підтверджує проведений теоретичний розрахунок. Зазначена обставина підтверджує припущення щодо можливості збільшення діелектричної проникності прошарку за рахунок нанесення на поліімїдну плівку тонкого шару Al₂O₃. Зростання діелектричної проникності у 3 рази призведе до зростання чутливості ЄП на основі такої структури також приблизно у 3 рази.

Як вже зазначалося [12], для виготовлення тонкоплівкових ЄП на основі гетероструктури поліімїд/ІТО поряд із кристалічною структурою плівок, котра обумовлює більшість їх властивостей, необхідно також контролювати поверхневий електричний опір, значення якого визначають можливість використання такої структури у якості обкладки ЄП без значних втрат корисного сигналу.

Для контролю поверхневого електричного опору тонкоплівкових матеріалів, зазвичай, використовується чотиризондовий метод [13]. Метод широко застосовується у лабораторній та виробничій практиці для визначення питомого електричного опору напівпровідникових монокристалів, пластин і однорідних тонких шарів у діапазоні 10^{-4} – $5 \cdot 10^3$ Ом·см, а також поверхневого електричного опору неоднорідних за товщиною епітаксialьних, дифузійних й іонно-легованих шарів у діапазоні 1 – $5 \cdot 10^5$ Ом [13]. Зазвичай зонди встановлюються на плоску поверхню зразка або уздовж однієї прямої лінії (рис. 4 а), або у вершин квадрата (рис. 4 б).

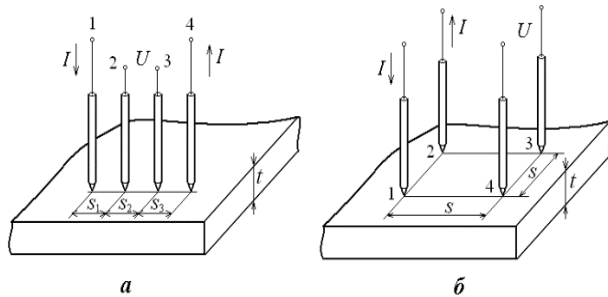


Рисунок 4 – Розташування системи зондів 1–4 у точках з відповідними номерами поверх напівпровідникового шару товщиною t :

а – уздовж однієї лінії зі співрозмірними відстанями між точковими вістрями сусідніх зондів s_1, s_2, s_3 ;
б – у вершинах квадрата зі стороною розміром s

Найчастіше на практиці використовують лінійне розташування зондів при $s_1 = s_2 = s_3 = s$. У такому разі питомий електричний опір визначається за співвідношенням:

$$\rho = \frac{2\pi t U_{hk}}{\ln 2 I_{ij}} \approx 9,06 \frac{U_{hk}}{I_{ij}} t = G_{\square} \frac{U_{hk}}{I_{ij}} t, \quad (6)$$

де у даному випадку $G_{\square} = \frac{2\pi}{\ln 2} \approx 9,06$.

Порівняння значень коефіцієнтів $G_{\square} \approx 4,53$ і $G_{\square} \approx 9,06$ дозволяє зробити висновок, що при лінійному розташуванні системи зондів чотиризондовий метод визначення ρ є найбільш чутливим.

У випадку однорідного тонкого напівпровідникового шару завтовшки t зв'язок між його питомим й поверхневим опором описується співвідношенням $\rho = \rho_s t$.

Принципову електричну схему методу зображено на рис. 5 стосовно лінійної системи розташування зондів поверх досліджуваного напівпровідникового шару.

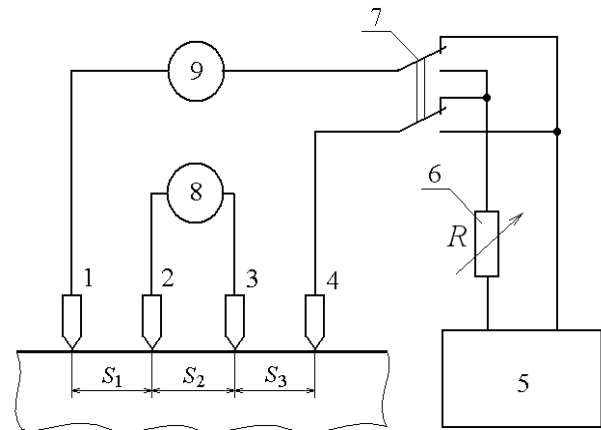


Рисунок 5 – Принципова електрична схема чотиризондового методу:

- 1–4 – система зондів;
- 5 – джерело постійної напруги;
- 6 – змінний резистор для регулювання режиму роботи джерела живлення вимірювального кола;
- 7 – перемикач на пряму струму;
- 8 – прилад для виміру різниці потенціалів U_{23} ;
- 9 – прилад для виміру струму I_{14}

Виходячи з обґрунтованої найбільш прийнятної комбінації струмових і потенціальних зондів [14], на рис. 5 струмові зонди мають номери 1 і 4, а потенціальні – номери 2 і 3. На рис. 5 наведено схематичне зображення електричної схеми чотиризондового методу. Зовнішній вигляд чотиризондової головки з м'яким піджимом зондів при проведенні досліджень наведено на рис. 6.

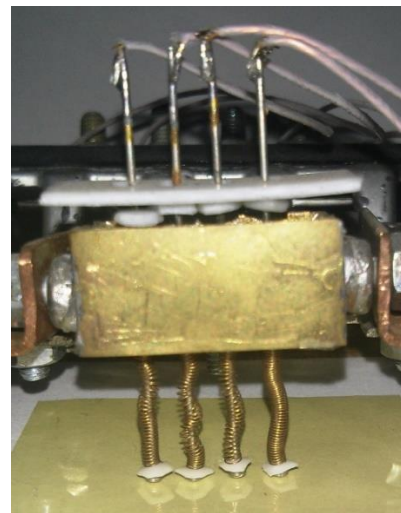


Рисунок 6 – Зовнішній вигляд чотиризондової головки з м'яким піджимом зондів при проведенні досліджень з визначення поверхневого опору шарів ІТО на полііміді

Результати дослідження електричних властивостей отриманих шарів ІТО представлені в таблиці 1. Товщина шарів ІТО отриманих на поліімідних підкладках немонотонно залежить від температури підкладки, тому як перша складно залежить від багатьох факторів [15]. Зі зростанням температури підкладки від 20 °С до 300 °С поверхневий електроопір (R_{\square}) шарів зменшується від 172 Ом/□ до

8 Ом/□. Дослідження електрорушійної сили Холла в цьому діапазоні свідчать про те, що спостережене зменшення питомого електроопору зумовлено зростанням концентрації основних носіїв заряду від $1,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ до $8,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ та зростанням рухливості основних носіїв заряду від $13 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ до $44 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (табл. 1). Подальше зростання температури підкладки до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ [16] призводить до збільшення поверхневого електроопору до $64 \text{ Ом}/\square$, що в першу чергу зумовлено відповідним різким зменшенням рухливості основних носіїв заряду.

Таблиця 1 – Електричні властивості шарів ІТО отриманих методом неактивного магнетронного розпилення на постійному струмі на поліімідних підкладках при різній температурі підкладки

T, °C	20	100	200	300	400	500
t, нм	219	205	198	201	260	228
R _□ , Ом/□	172	76	32	8	11	14
ρ, 10 ⁻⁴ Ом·см	38	16	6,3	1,7	2,7	3,2
n, 10 ²⁰ см ⁻³	1,3	2,4	5,7	8,3	9,8	12
μ, см ² /(В·с)	13	17	18	44	23	17

Отримані значення поверхневого опору свідчать про те, що у разі застосування таких двошарових тонкоплівкових структур в якості ЄП, найбільш оптимальною температурою підкладки при осадженні шару ІТО є температура на рівні $300 \text{ }^\circ\text{C}$ [17] при якій досягається величини поверхневого опору на рівні $8 \text{ Ом}/\square$.

Для експериментального підтвердження можливості збільшення чутливості методу за рахунок використання ЄП на основі структури Al/ITO/поліімід/Al₂O₃ у порівнянні з класичними перетворювачами було проведено дослідження серії зразків із алюмінію на частоті коливань $2,5 \text{ МГц}$. Приклад отриманих осцилограм прийнятих сигналів для обох типів перетворювачів при однаковій величині збуджуючого сигналу наведено на рис. 7.

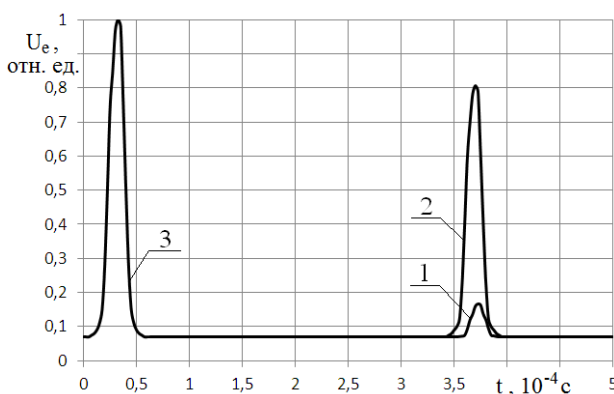


Рисунок 7 – Нормалізовані осцилограми прийнятих сигналів від класичного ЄП (1) та запропонованого тонкоплівкового на основі структури Al/ITO/поліімід/Al₂O₃ (2) у порівнянні з однаковим збуджуючим сигналом (3)

Як видно з рис. 7, величина прийнятого сигналу у разі використання тонкоплівкового перетворювача зростає у 7,6 рази у порівнянні з класичним перетворювачем, що добре корелює з проведеними

вимірами діелектричної проникності діелектричних шарів та з урахуванням зменшення товщини діелектричного прошарку. Таким чином, експериментально підтверджується зростання чутливості ємнісного методу у разі використання тонкоплівкових ЄП на основі структури Al/ITO/поліімід/Al₂O₃.

Дослідження впливу геометричних розмірів базових гетеросистем Al/ITO/поліімід/Al₂O₃ ЄП на рівень корисного сигналу. Проведені теоретичні дослідження ЄП та розроблена методика розрахунку основних параметрів [12], дали змогу дослідити основні чинники, які впливають на результати контролю. Згідно формули

$$U_z(M, t) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{4\pi K_0} \times \iint_D \frac{\sin[\omega/a\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}]}{\omega/a\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}} + \frac{P_0 \sin \omega t}{4\pi K_0} \times \iint_D \frac{1 - \cos[\omega/a\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}]}{\omega/a((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)} dx dy \quad (8)$$

можна розрахувати вплив форми електроду на результати контролю.

Для початку розглянемо найбільш поширену форму електроду – прямокутну. Ескіз якої зображено на рис. 8.

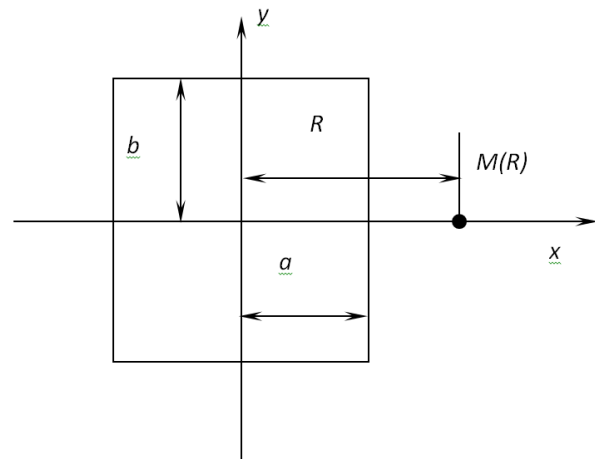


Рисунок 8 – Ескіз прямокутної ємнісної пластини над поверхнею ОК

На рис. 8 показана прямокутна конденсаторна пластинка з розмірами $2a \times 2b$. Точка контролю акустичного зсуву розташована на осі Ox на відстані R від початку координат.

Скористаємося формулою (8) і запишемо вираз для акустичного зсуву $U_z(R, t)$ у наступному вигляді:

$$U_z(R, t) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{4\pi K_0} \times \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{\sin[k\sqrt{(x-R)^2+y^2}] - \frac{1-\cos[k\sqrt{(x-R)^2+y^2}]}{k\sqrt{(x-R)^2+y^2}}}{\sqrt{(x-R)^2+y^2}} dx dy. \quad (9)$$

Очевидно, що змінивши відповідним чином межі інтегрування та підінтегральну функцію можна отримати аналогічний вираз для точок, що потрапляють на вісь Oy , оскільки задача симетрична відносно осей координат.

Після переходу від подвійного інтегралу до повторного інтегралу у полярних координатах та обчислення внутрішніх інтегралів, отримуємо:

$$U_z(R, t) = \frac{P_0 \sin \omega t}{2\pi K_0 \cdot k^2} \left[\frac{1}{a-R} \times \int_0^{\arctg\left(\frac{b}{(a-R)}\right)} \left(1 - \cos \frac{k(a-R)}{\cos \psi}\right) \cos \psi d\psi + \frac{1}{b} \int_{\arctg\left(\frac{b}{(a-R)}\right)}^{\pi - \arctg\left(\frac{b}{(a-R)}\right)} \left(1 - \cos \frac{kb}{\sin \psi}\right) \sin \psi d\psi - \frac{1}{a+R} \int_{\pi - \arctg\left(\frac{b}{(a-R)}\right)}^{\pi} \left(1 - \cos \frac{k(a+R)}{\cos \psi}\right) \cos \psi d\psi \right], \quad (10)$$

де виконані умови $b \leq a, R \leq a$, тобто розглядаються точки, що знаходяться під пластиною конденсатора.

Аналогічний, однак дещо інакший за формою результат відповідає зовнішній по відношенню до пластини частині площини.

Подальше інтегрування проводиться чисельно за допомогою відповідних програм комплексу MathCAD. Щоб переконатися у правильності такого підходу був змінений порядок інтегрування. Виявилось, що результати інтегрування у всіх точках поверхні, у тому числі і в точках межі прямокутника, від вибору порядку не залежить.

Якщо у формулі (10) спрямувати хвильове число $k \rightarrow 0$, то ми отримаємо квазістатичне коливання поверхні деталі, що відповідає частоті збуджуючого тиску:

$$U_z(R, t) = \frac{P_0 \sin \omega t}{4\pi K_0} \times \left[\int_0^{\arctg\left(\frac{b}{(a-R)}\right)} \frac{a-R}{\cos \psi} d\psi + \int_{\arctg\left(\frac{b}{(a-R)}\right)}^{\pi - \arctg\left(\frac{b}{(a-R)}\right)} \frac{b}{\sin \psi} d\psi - \int_{\pi - \arctg\left(\frac{b}{(a-R)}\right)}^{\pi} \frac{a+R}{\cos \psi} d\psi \right]. \quad (11)$$

Аналіз результатів показав, що можна користуватися більш простою формулою (11) замість формули (10) при виконанні умови:

$$k \cdot a < 0,1$$

де a – розмір конденсатора.

З урахуванням характерних розмірів конденсатора, розбіжність між динамічною та квазістатичною моделлю стає суттєвою лише для збудження на частотах ультразвукового діапазону та діапазону радіочастот.

Для прикладу, отримаємо результати розрахунку акустичного зміщення поверхні ОК (сталевий зразок) при фіксованому збуджуючому тиску $P_0=10^4$ Па. Значення частоти збуджуючого тиску відповідають 0,1; 2; 5; 10 МГц. Розміри електроду 15×15 мм. Приклад залежності величини зсуву U_z для частоти 10 МГц наведено на рис. 9.

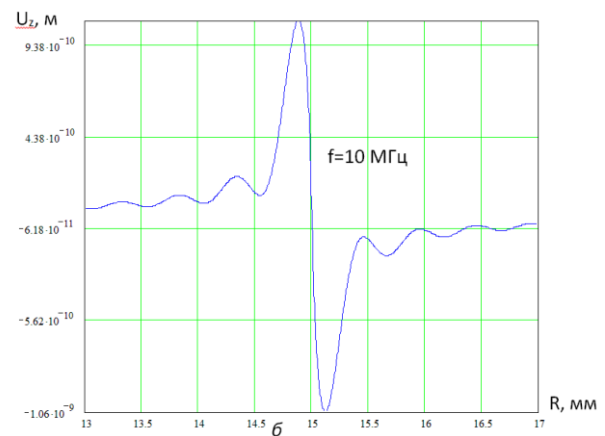
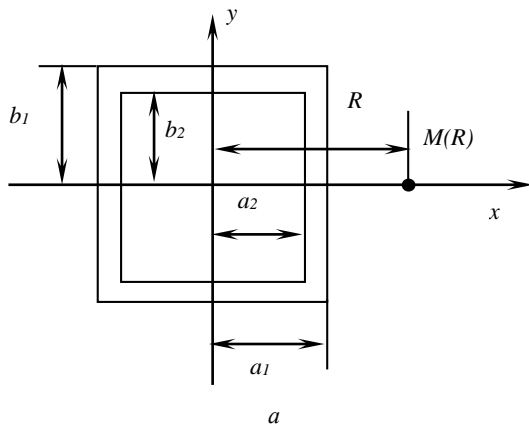


Рисунок 9 – Графічні залежності амплітуди акустичних коливань поверхні ОК для прямокутного перетворювача при частоті 10 МГц

Аналізуючи графічні залежності акустичного зміщення U_z для круглої та прямокутної пластини можна зробити висновок, що відбувається витіснення акустичного поля хвилі на край пластини, де спостерігається максимальна амплітуда акустичних коливань. Внутрішні області пластини створюють відносно низькі по амплітуді коливання пружного середовища [18]. При цьому спостерігається практично повне загасання пружних хвиль вже на відстані a від краю пластини, зсув точок поверхні зменшується із зростанням частоти збуджуючого тиску.

Спробуємо змінити конфігурацію пластини для можливого отримання більш якісного, з точки зору амплітуди акустичного зміщення матеріальних точок середовища.

На рис. 10 показана фігура, в площі якої діє зонduючий тиск P . Фігура являє собою прямокутну пластину розміром $2a \times 2b$, з прямокутним вирізом $2a_2 \times 2b_2$. Аналогічно попередньому випадку знайдемо залежність акустичного зміщення $U_z(M)$ в точці $M(R)$.



б

Рисунок 10 – Ескіз прямокутної смісної пластини (а) та її зображення (б) з прямокутним вирізом над поверхнею ОК

Позначимо підінтегральний вираз у формулі (9) як $\Phi(R)$. Тоді вираз для акустичного зміщення прийме вигляд:

$$U_z(M) = -\frac{P_0 \sin \omega t}{2\pi K_0} \times \left[\int_{-a_1}^{a_1} \int_{-b_1}^{b_1} \Phi(R) - \int_{-a_2}^{a_2} \int_{-b_2}^{b_2} \Phi(R) \right] dx dy. \quad (12)$$

Для порівняння ефектів, пов'язаних з геометрією збуджуючого електроду приймемо для розрахунку ті ж початкові параметри (тиск, площа) що і для прямокутної пластини і отримаємо результати зміщення $U_z(M)$ для частоти 2 МГц для електроду з вирізом $r_2 = 16$ мм (рис. 11). Цифрами 1 і 2 позначені графічні залежності зсуву для суцільної пластини і пластини з вирізом, відповідно. Аналізуючи графічні залежності можна зробити висновок, що в цьому випадку з'являється реакція поверхні контролю на збуджуючий тиск поблизу внутрішньої границі електроду з практично такою ж амплітудою, що і для суцільної пластини [19]. Причому, у разі великого внутрішнього вирізу, спостерігається збільшення амплітуди зміщення (в 2 рази) в зоні границі електроду.

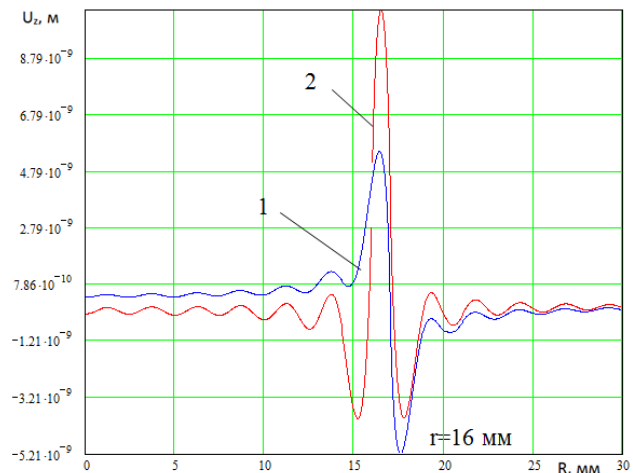


Рисунок 11 – Графічні залежності амплітуди зміщення для круглої пластини та круглої пластини з круглим вирізом

Як і в попередньому випадку, максимальна амплітуда акустичного зміщення поверхні ОК припадає на край пластини, амплітуда коливань практично не залежить від форми пластини і спостерігається ефект збільшення амплітуди зміщення для великого внутрішнього вирізу.

З фізичної точки зору даний результат можна пояснити тим, що акустичні коливання поширюються з однаковою амплітудою, як в зовнішні області пластини, так і у внутрішні. В останньому випадку, відбувається накладання коливань з протилежного фази, що призводить до загасання амплітуди коливань у внутрішніх областях пластини.

З графічних залежностей можна також зробити висновок про те, що конфігурація плоского електроду не впливає на шукане акустичне зміщення U_z , а визначається тільки його розмірами і амплітудою збуджуючого тиску P_0 .

Висновки. Створено дослідний зразок тонкоплівкового ЄП для акустичного контролю металевих виробів на основі гетеросистеми Al/ITO/поліімід/Al₂O₃. Проведено експериментальне дослідження дослідного зразка та встановлено, що використання тонкоплівкового ЄП на основі структури Al/ITO/поліімід/Al₂O₃ підвищує чутливість ємнісного методу у 7,6 рази за рахунок збільшення діелектричної проникності діелектричного шару та зменшення товщини ЄП. Встановлено, що поверхневий електропір шарів ITO при оптимальних режимах осадження дорівнює 8–15 Ом/□. Дослідження електрорушійної сили Холла свідчать про те, що отримане значення питомого електроопору зумовлене концентрацією основних носіїв заряду від близько $8,3 \cdot 10^{20}$ см⁻³ та рухливістю основних носіїв заряду на рівні 44 см²/(В·с). Визначено, що використання плівки Al₂O₃ у гетеросистемі поліімід/Al₂O₃ призводить до зростання величини діелектричної проникності структури, котра складає 8,5–11,5 відн. од., що приблизно у 3 рази більше відносно поліімідної плівки (3–3,9 відн. од.) при частотах збуджуючого сигналу у діапазоні 10 Гц–10 МГц. Амплітуду прийнятого сигналу можна збільшити додатково у 2 рази за

рахунок використання ЄП у формі квадрату з великим віризом відповідної форми всередині.

Список літератури

1. Патон Б. Є., Троїцький В. О., Посипайко Ю. М. Неруйнівний контроль в Україні. Інформаційний бюллетень Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. 2003. № 2(18). С. 5–9.
2. Non-Destructive in situ strength assessment of concrete / ed. by D. Breyse, J.-P. Balayssac. Cham : Springer International Publishing, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64900-5>.
3. Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. Методические рекомендации для специалистов-дефектоскопистов. Киев : ИЭС им. Е. О.Патона, 1997. 224 с.
4. Білокур І. П. Акустичний контроль : навч. посіб. Київ : ІЗМН, 1997. 244 с.
5. Ahmed M., Bakry A., Qasem A., Dalir H. The main role of thermal annealing in controlling the structural and optical properties of ITO thin film layer. *Optical Materials*. 2021. Vol. 113. P. 110866. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.110866>.
6. Ali A. H., Hassan Z., Shuhaimi A. Enhancement of optical transmittance and electrical resistivity of post-annealed ITO thin films RF sputtered on Si. *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 443. P. 544–547. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.024>.
7. Zaitseva L. V., Vodorig O. S., Zaitsev R. V. ITO/polyimide/Al₂O₃ thin film structure for capacitive transducers. *Energy: Series "Modern problem of power engineering and ways of solving them"*. 2020. Vol. 96, no. 4. P. 124–127.
8. Markov L. K., Pavluchenko A. S., Smirnova I. P., Mesh M. V., Kolokolov D. S. Application of atomic layer deposition for the formation of nanostructured ITO/Al₂O₃ coatings. *Semiconductors*. 2021. Vol. 55, no. 4. P. 438–445. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063782621040102>.
9. Zuo H.-T., Gan F., Dong J., Zhang P., Zhao X., Zhang Q.-H. Highly transparent and colorless polyimide film with low dielectric constant by introducing meta-substituted structure and trifluoromethyl groups. *Chinese Journal of Polymer Science*. 2021. Vol. 39, no. 4. P. 455–464. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10118-021-2514-2>.
10. Dasgupta K., Bose S., Mondal A., Jana S., Gangopadhyay U. Fabrication and mathematical modelling of a ITO-Al₂O₃-Si SIS solar cell. *Silicon*. 2022. Vol. 14, no. 17. P. 11963–11977. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01910-5>.
11. Wang X., Suwardi A., Lim S. L., Wei F., Xu J. Transparent flexible thin-film p-n junction thermoelectric module. *NPJ Flexible Electronics*. 2020. Vol. 4, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41528-020-00082-9>.
12. Zaitseva L. V., Khrypunov G. S., Zaitsev R. V., Momotenko O. V. Advanced capacitive converters based on Al/ITO/polyimide/Al₂O₃ heterostructures. *XV International Conference on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 11–16 May 2015. P. 312.
13. Orji N. G., Badaroglu M., Barnes B. M. et al. Metrology for the next generation of semiconductor devices. *Nature Electronics*. 2018. Vol. 1, no. 10. P. 532–547. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0150-9>.
14. Zhang L., Ran J., Qiao S.-Z., Jaroniec M. Characterization of semiconductor photocatalysts. *Chemical Society Reviews*. 2019. Vol. 48, no. 20. P. 5184–5206. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9cs00172g>.
15. Bahar J., Lghazi Y., Youbi B., Ait Himi M., Bimaghra I. Comparative study of nucleation and growth mechanism of cobalt electrodeposited on ITO substrate in nitrate and chloride electrolytes. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2021. Vol. 25, no. 6. P. 1889–1900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10008-021-04961-7>.
16. Raman V., Cho Y.-H., Park J.-H., Chinnadurai D., Kim H.-K. Impact of low temperature plasma annealing for flexible, transparent and conductive ITO/PEDOT:PSS composite electrode. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 93. P. 423–429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.10.021>.
17. Jeong W.-L., Min J.-H., Kwak H.-M. et al. A highly conductive and flexible metal mesh/ultrathin ITO hybrid transparent electrode fabricated using low-temperature crystallization. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 794. P. 114–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.249>.
18. Hrabová K., Hübllová S., Cíkrle P., Vymazal T. Using the ultrasonic method for the defectoscopy of failures in reinforced concrete columns. *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 322. P. 203–208. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.322.203>.
19. Bolotina I. O., Sednev D. A., Portenko V. A. Ultrasonic testing method for quality control of mold castings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 511. P. 012043. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/511/1/012043>.

References

1. B. Ye. Paton, V. O. Troitskyi, and Yu. M. Posypaiko, "Neruinivnyi kontrol v Ukraini [non-destructive testing in Ukraine]," *Information Bulletin of the Ukrainian Society of Nondestructive Testing and Technical Diagnostics*, vol. 2, no. 18, pp. 5–9, 2003.
2. D. Breyse and J.-P. Balayssac, Eds., *Non-Destructive in Situ Strength Assessment of Concrete*. Cham: Springer International Publishing, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64900-5>.
3. V. A. Troickij, *Kratkoe posobie po kontrolju kachestva svarnyh soedinenij. Metodicheskie rekomendacii dlja specialistov-defektoskopistov [Brief manual on quality control of welded joints. Guidelines for specialist defectoscopists]*. Kyiv: IES named after E. O. Patona, 1997.
4. I. P. Bilokur, *Akustychnyi kontrol [Acoustic control]*. Kyiv: IZMN, 1997.
5. M. Ahmed, A. Bakry, A. Qasem, and H. Dalir, "The main role of thermal annealing in controlling the structural and optical properties of ITO thin film layer," *Optical Materials*, vol. 113, p. 110866, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.110866>.
6. A. H. Ali, Z. Hassan, and A. Shuhaimi, "Enhancement of optical transmittance and electrical resistivity of post-annealed ITO thin films RF sputtered on Si," *Applied Surface Science*, vol. 443, pp. 544–547, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.024>.
7. L. V. Zaitseva, O. S. Vodorig, and R. V. Zaitsev, "ITO/polyimide/Al₂O₃ thin film structure for capacitive transducers," *Energy: Series "Modern Problem of Power Engineering and Ways of Solving Them"*, vol. 96, no. 4, pp. 124–127, 2020.
8. L. K. Markov, A. S. Pavluchenko, I. P. Smirnova, M. V. Mesh, and D. S. Kolokolov, "Application of atomic layer deposition for the formation of nanostructured ITO/Al₂O₃ coatings," *Semiconductors*, vol. 55, no. 4, pp. 438–445, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1134/s1063782621040102>.
9. H.-T. Zuo, F. Gan, J. Dong, P. Zhang, X. Zhao, and Q.-H. Zhang, "Highly transparent and colorless polyimide film with low dielectric constant by introducing meta-substituted structure and trifluoromethyl groups," *Chinese Journal of Polymer Science*, vol. 39, no. 4, pp. 455–464, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10118-021-2514-2>.
10. K. Dasgupta, S. Bose, A. Mondal, S. Jana, and U. Gangopadhyay, "Fabrication and mathematical modelling of a ITO-Al₂O₃-Si SIS solar cell," *Silicon*, vol. 14, no. 17, pp. 11963–11977, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01910-5>.
11. X. Wang, A. Suwardi, S. L. Lim, F. Wei, and J. Xu, "Transparent flexible thin-film p-n junction thermoelectric module," *NPJ Flexible Electronics*, vol. 4, no. 1, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-020-00082-9>.
12. L. V. Zaitseva, G. S. Khrypunov, R. V. Zaitsev, and O. V. Momotenko, "Advanced capacitive converters based on Al/ITO/polyimide/Al₂O₃ heterostructures," in *XV International Conference on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems*, Ivano-Frankivsk, Ukraine, May 11–16, 2015. p. 312.
13. N. G. Orji et al., "Metrology for the next generation of semiconductor devices," *Nature Electronics*, vol. 1, no. 10, pp. 532–547, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0150-9>.
14. L. Zhang, J. Ran, S.-Z. Qiao, and M. Jaroniec, "Characterization of semiconductor photocatalysts," *Chemical Society Reviews*, vol. 48, no. 20, pp. 5184–5206, 2019, doi: <https://doi.org/10.1039/c9cs00172g>.
15. J. Bahar, Y. Lghazi, B. Youbi, M. Ait Himi, and I. Bimaghra, "Comparative study of nucleation and growth mechanism of cobalt electrodeposited on ITO substrate in nitrate and chloride electrolytes," *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 25, no. 6, pp. 1889–1900, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10008-021-04961-7>.

16. V. Raman, Y.-H. Cho, J.-H. Park, D. Chinnadurai, and H.-K. Kim, "Impact of low temperature plasma annealing for flexible, transparent and conductive ITO/PEDOT:PSS composite electrode," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 93, pp. 423–429, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.10.021>.
17. W.-L. Jeong et al., "A highly conductive and flexible metal mesh/ultrathin ITO hybrid transparent electrode fabricated using low-temperature crystallization," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 794, pp. 114–119, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.249>.
18. K. Hrabová, S. Hübllová, P. Cikrle, and T. Vymazal "Using the Ultrasonic Method for the Defectoscopy of Failures in Reinforced Concrete Columns," *Solid State Phenomena*, vol. 322, p. 203–208, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.322.203>.
19. I. O. Bolotina, D. A. Sednev, and V. A. Portenko "Ultrasonic testing method for quality control of mold castings", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 511, art. 012043, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/511/1/012043>.

Надійшла (received) 10.11.2022

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Зайцева Лілія Василівна (Liliia Zaitseva) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4405-1531>; e-mail: liliia.zaitseva@khp.edu.ua.

Добржан Андрій Ігорович (Andrii Dobrozhan) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри мікро- та наноелектроніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>; e-mail: dobr.abs@gmail.com.

Хрипунов Геннадій Семенович (Gennadiy Khrypunov) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», проректор з науково-педагогічної роботи; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: khrip@ukr.net.

Хрипунов Михайло Семенович (Mykhailo Khrypunov) – аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8623-5174>; e-mail: mykhailo.khrypunov@infiz.khpi.edu.ua.