

Вимірювання п'єзоелектричних характеристик діодних структур на векторному аналізаторі «Обзор-103»

Цибульський^f О. С., ORCID [0000-0002-4941-0057](https://orcid.org/0000-0002-4941-0057)

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

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Семікіна^s Т. В., к.т.н. с.н.с., ORCID [0000-0002-6182-4703](https://orcid.org/0000-0002-6182-4703)

ІФН ім. В. С. Лашкарьова НАН України

Київ, Україна

Анотація—В роботі наведено результати дослідження напівпровідникових плівкових гетеро структур CdS-Cu₂S та CdS-ZnS-Cu₂S методом резонансу-антирезонансу. Виміри амплітудно-частотних характеристик було виконано за допомогою векторного аналізатора «Обзор-103». Викладена методика дослідження з використанням векторного аналізатора «Обзор-103». На основі визначених значень частот резонансу та антирезонансу зроблено розрахунки добротності досліджених гетеро структур та величини ємностей. Найбільші значення добротностей (~62) отримано для гетеро структури CdS-ZnS-Cu₂S. Проведено аналіз отриманих результатів.

Ключові слова — амплітудно-частотні характеристики; напівпровідникові плівки; гетероструктури; п'єзоелектричні властивості.

I. ВСТУП

Вироби п'єзоелектричного приладобудування знаходять широке застосування в різних областях техніки. Це гідроакустика, віброметрія, системи ультразвукового контролю та діагностики, радіоелектроніка, та ін. До складу п'єзоелектричних приладів завжди входять п'єзоперетворювачі, основу яких складають п'єзо елементи, виготовлені з матеріалу, який має прямий чи зворотний п'єзо ефект. Властивості п'єзо матеріалів та перетворювачів характеризуються певним набором параметрів, значення яких можна отримати шляхом прямих та непрямих вимірів наведених в ОСТ П 0444-87 та ОСТ П 0602-88 з наступним виконанням досить складних матричних розрахунків із застосуванням від 4 до 8 тензорних величин стосовно ОСТ П 0444-87 та ОСТ П 0602-88.

Одним із запропонованих в ОСТ П 0602-88 методів дослідження п'єзохарактеристик матеріалів є метод резонансу-антирезонансу. При цьому дослідженні виконується вимірювання амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) для знаходження частот резонансу чи антирезонансу, які є маркерами наявності п'єзо ефекту в досліджуваному матеріалі [1]. Для вимірювання АЧХ було обрано векторний аналізатор «Обзор-103», який є сучасним вимірювальним приладом з автоматичним проведенням вимірів та широким частотним діапазоном до 1,3 МГц.

Дослідження АЧХ було проведено на напівпровідникових тонкоплівкових гетеро структурах CdS-Cu₂S та CdS-ZnS-Cu₂S. Дані гетеро структури було обрано, оскільки відомо, що монокристалічні матеріали CdS та ZnS завдяки своїй нецентросиметричній структурі мають п'єзовластивості [2-3]. Новизною роботи є дослідження не окремих плівок, а гетероструктур, де присутній верхній (Cu₂S) та нижній (молібденова підкладина) струмоз'ємні контакти. Це дозволяє подавати на гетероструктуру електричний сигнал та знімати за допомогою аналізатора «Обзор-103» відбитий електричний сигнал. Актуальність роботи полягає в можливості розробки нових функціональних приладів на основі напівпровідникових тонких плівок та структур.

II. ДОСЛІДЖЕННЯ П'ЄЗОВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСУ-АНТИРЕЗОНАНСУ

Математичною моделлю, що використовується в методі резонансу-антирезонансу, служать вирази для комплексної провідності або імпедансу отримані з рішення електромеханічної задачі про одновимірні коливання п'єзо елементів [4]. Додаткові вимірювання вільних частот коливання зразку дозволяють оцінити величину п'єзоконстант та інших електричних параметрів.

Основними недоліками методу є:



- заміна частот послідовного f_s і f_p паралельного резонансів, для яких існують основні співвідношення, на частоти f_m і f_n , відповідно, тому що у вихідних формулах не враховано механічні, п'єзоелектричні і діелектричні та інші втрати;
- діелектричні параметри вимірюються на низьких, а не на робочих частотах;
- вплив кінцевих розмірів на точність визначення констант п'єзоматеріалів і п'єзорезонаторів.

Основними перевагами методу є:

- простота і доступність математичного та апаратного забезпечення;
- висока точність визначення характеристичних частот та розрахованих з їх допомогою констант.

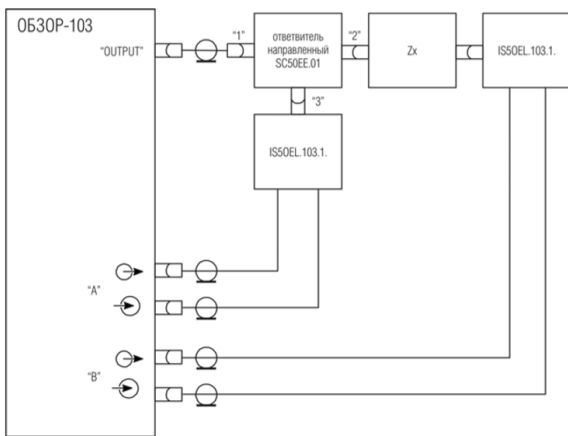


Рис. 1. Схема вимірювання комплексного коефіцієнта відбиття S11 і комплексного коефіцієнта передачі S21 чотириполюсника в тракті 50 Ом

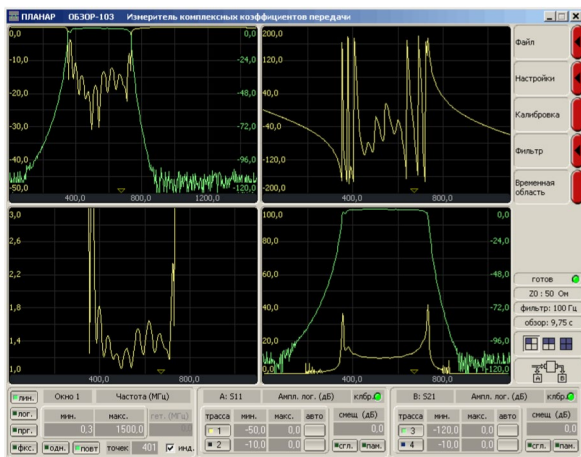


Рис. 2. Екран програмного забезпечення вимірювача комплексних коефіцієнтів передачі «Обзор – 103»

III. ВЕКТОРНИЙ АНАЛІЗАТОР «ОБЗОР-103» ЯК ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ П'ЄЗОВЛАСТИВОСТЕЙ

«Обзор-103» — це векторний аналізатор ланцюгів, він вимірює параметри проходження сигналу через зразок та фіксує характеристики сигналу відображеного від його портів. Цей вимірювач призначений для вимірювання S — параметрів радіотехнічних пристроїв [5].

Вимірювані параметри включають комплексний коефіцієнт відбиття S11 і комплексний коефіцієнт передачі S21. Кожен S-параметр містить амплітудно-частотну (АЧХ) і фазо-частотну (ФЧХ) характеристики зразка у відповідному напрямку.

Комплексний коефіцієнт відображення S11 визначається як відношення напруги відбитого сигналу до напруги вхідного сигналу в комплексному вигляді.

Комплексний коефіцієнт передачі S21 визначається як відношення напруги вихідного сигналу до напруги вхідного сигналу в комплексному вигляді.

Порядок проведених вимірювань комплексного коефіцієнта відбиття та передачі на векторному аналізаторі «Обзор – 103»:

- 1) Для вимірювання комплексного коефіцієнта відбиття S11 і комплексного коефіцієнта передачі S21 досліджуваних зразків в тракті 50 Ом була зібрана схема згідно Рис. 1.
- 2) Встановлений режим вимірювання № 1.
- 3) Встановлені параметри частотного сканування — нижня і верхня частота 100 кГц та 1300 кГц відповідно, число точок 401. Встановлена смуга вимірювального фільтра 3 кГц.
- 4) Проведено калібрування входу «А». При цьому була використана калібрувальна міра 50 Ом.
- 5) Проведено калібрування частотної нерівномірності передачі входу «В». Для чого було здійснено один вимір калібрувальної міри «Перемичка». У схемі на Рис. 1 були з'єднати роз'єми для підключення зразку Zx між собою і проведено процедуру калібрування. Калібрування частотної нерівномірності передачі застосовується автоматично, якщо було проведено однопортове калібрування для входу «А».
- 6) В схему було ввімкнено досліджуваний зразок.
- 7) В одному каналі індикації вимірювання «S11 вхід А», в іншому каналі індикації — вимірювання «S21 вхід В». Формат представлення S11 і S21 було обрано прямокутним.
- 8) Вимірювання коефіцієнтів S11 і S21 проводяться за допомогою графіків і маркерів, приклад зображено на Рис. 2.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

В якості зразків були використанні напівпровідникові гетеро структури CdS-Cu₂S та CdS-ZnS-Cu₂S нанесені на молібденову основу. Молібденова основа використовувалась як перший струмознімаючий контакт. В якості другого струмознімаючого контакту використовувався вироджений напівпровідник р-типу Cu₂S.

Використовуючи ВККП «Обзор – 103» були виміряні комплексні коефіцієнти відбиття S11 зразків та зафіксовані резонансні смуги від 883 до 1273 МГц.

Приклад характеристики наведений на Рис. 3.

V. РОЗРАХУНКИ

Розрахуємо добротність для гетероструктур за відомою формулою [4, 6]:

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f}, \quad (1)$$

де f_p – антирезонансна частота, Гц; Δf – абсолютний резонансний проміжок ПКЕ по величині 0,7 від амплітудного значення, Гц.

Результати вимірювань та розрахунків представимо в таблиці 1.

Розрахуємо ємність С за формулою яку можна з легкістю вивести с формули (1) за умови відомих параметрів R та Q [7, 8]:

$$C = \frac{1}{(\omega_p R Q)},$$

де ω_p – кутова частота, рад/с; R – активний опір, Ом.

В якості активного опору використаємо значення що були виміряні на вимірювачі імпедансу «E7-20» для заданих зразків при напрузі 0,5 В, на частотах 900-1000 кГц. Результати представимо у зведеній табл.2.

Порівняння значень в таблиці показує істотну різницю в поведінці зразків на основі CdS та ZnS. У порівнянні з даними ємності та добротності для п'єзокерамічних елементів, представлених в ОСТ II 0444-78. Досліджені нами структури показали значно менші значення добротності та ємності. Значно менші значення добротності пояснюються тим, що в роботі було досліджено тонко плівкові структури, а не об'ємні п'єзо керамічні елементи, значення яких наведено в ОСТ II 0444-78. Значення добротності 62,65 для структури CdS-ZnS-Cu₂S є досить великим у порівнянні навіть із значенням для такої відомої п'єзо кераміки як ЦТС-19, значення добротності якої дорівнює 60 і яка є об'ємним матеріалом [9]. Таким чином проведені дослідження для оцінки п'єзоелектричних властивостей гетероструктур з напівпровідниковими плівками CdS-Cu₂S та CdS-ZnS-Cu₂S демонструють наявність п'єзо властивостей цих структур та перспективу їх розвитку [10].

ВИСНОВКИ

В результаті вимірювання комплексних коефіцієнтів відбиття S11 гетеро структур CdS-Cu₂S та CdS-ZnS-Cu₂S показали, що плівки мають п'єзоелектричні

властивості. Зразки на основі ZnS демонструють найбільше значення добротності 62,65. Для структур з плівками CdS значення добротності менше 27,94. Отримані результати є новими і показують перспективність досліджень напівпровідникових гетеро структур для розробки нових п'єзо електричних пристроїв.

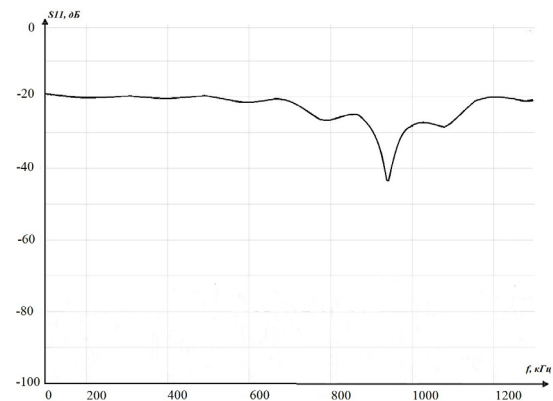


Рис. 3. Комплексний коефіцієнт відбиття S11 зразку 1: CdS-Cu₂S-407

ТАБЛИЦЯ 1. ДОБРОТНІСТЬ ЗРАЗКІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Зразок	Параметри		
	f, МГц	Δf, кГц	Q
1: CdS-Cu ₂ S	0,920	74	12,43
2: CdS-Cu ₂ S	0,950	35	27,14
3: CdS-Cu ₂ S	0,950	34	27,94
1-3: CdS-ZnS-Cu ₂ S	0,487	64	7,6
2-3: CdS-ZnS-Cu ₂ S	0,985	25	39,4
2-4: CdS-ZnS-Cu ₂ S	1,254	54	52,25
3-4: CdS-ZnS-Cu ₂ S	1,253	20	62,65

ТАБЛИЦЯ 2 ЗВЕДЕНІ ПАРАМЕТРИ ДОСЛІДЖЕНИХ ЗРАЗКІВ

Зразок	Параметри			
	ω _p , рад/с	Q	R, кОм	C, пФ
1: CdS-Cu ₂ S	5780,5*10 ⁶	12,43	3	0.004639
2: CdS-Cu ₂ S	5969*10 ⁶	27,14	2,84	0.00217
3: CdS-Cu ₂ S	5969*10 ⁶	27,94	2,91	0.00206
1-3: CdS-ZnS-Cu ₂ S	3059,9*10 ⁶	7,6	3,75	0.0114
2-3: CdS-ZnS-Cu ₂ S	6188,9*10 ⁶	39,4	3,98	0.00103
2-4: CdS-ZnS-Cu ₂ S	7879,1*10 ⁶	52,25	3,81	0.000637
3-4: CdS-ZnS-Cu ₂ S	7872,8*10 ⁶	62,65	4,3	0.000471



ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] O. N. Petrishchev, K. V. Bazilo, "Metodika opredeleniya fiziko-mekhanicheskikh parametrov p'yezoelektricheskoy keramiki [Method for determining the physical and mechanical parameters of piezoelectric ceramics]", Zhurn. nano- ta yelektron. fiziki, № 3(9), s. 03022-1-03022-6, 2017, DOI: [10.21272/jnep.9\(3\).03022](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03022).
- [2] G. R. Sagatelyan, Tekhnologiya izgotovleniya p'yezoelektricheskikh preobrazovatelei dlya apparatov ul'trazvukovoї terapii, diagnostiki i khirurgii [Manufacturing technology of piezoelectric transducers for ultrasound therapy, diagnostics and surgery devices]. Izdatel'stvo MGTU, 1993, c. 64, ISBN: 5-7038-0949-5
- [3] V. V. Yanchich, P'yezoelektricheskiye vibrozmeritel'nyye preobrazovateli (akselerometry) [Piezoelectric vibration measuring transducers (accelerometers)]. Rostov-na-Donu: Izdatel'stvo YUFU, 2010. s. 304, ISBN: 978-5-9275-0728-3
- [4] V. L. Zemlyakov, Izmeritel'nyye tekhnologii v p'yezoelektricheskoy priborostroyenii [Measuring technologies in piezoelectric instrument making]. Rostov-na-Donu, 2010, s. 114, ISBN: 5941531184
- [5] *Izmeritel' kompleksnykh koeffitsiyentov peredachi «Obzor – 103» Rukovodstvo po ekspluatatsii, RE 6687–028–21477812–2008. [Meter of complex transmission coefficients "Obzor - 103" Operation manual, OM 6687-028-21477812-2008]* Available <http://www.emftest.ru/media/2017/07/Obzor103RE.pdf> (Access date 6.7.2020).
- [6] V. L. Zemlyakov, "Prostoy metod opredeleniya p'yezmodulya [A simple method for determining the piezomodule]", Izvestiya YUFU. Tekhnicheskoye nauk, № 2, ss. 147–151, 2010 Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13617281> (Access date 6.7.2020).
- [7] V. L. Zemlyakov, S. N. Klyuchnikov, "Opredeleniye p'yezomodulya materiala p'yezokeramicheskogo elementa [Determination of the piezomodule of the material of a piezoceramic element]", Inzhenernyy vestnik Dona, № 2, ss. 374-384, 2012. Available: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/803> (Access date 6.7.2020).
- [8] V. L. Zemlyakov, "Metody i sredstva tekhnicheskoy diagnostiki p'yezokeramicheskikh elementov [Methods and means of technical diagnostics of piezoceramic elements]", Izv. vuzov. Priborostroyeniye, № 10, ss. 61–65, 2010. Available: <http://pribor.ifmo.ru/file/article/5274.pdf> (Access date 6.7.2020).
- [9] V. M. Sharapov, Ye. S. Polishchuk, Datchiki: Spravochnoye posobiye [Sensors: A Handbook]. Pod obshch. red. Moskva: Tekhnosfera, 2012. 624 s. ISBN 9785948363165
- [10] S. Zhukov, "O p'yezokeramike i perspektivakh yeye primeneniya [On piezoceramics and the prospects for its application]", Komponenty i tekhnologii, № 1, ss. 48-51, 2001. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-piezokeramike-i-perspektivah-ee-primeneniya/viewer> (Access date 6.7.2020).

Надійшла до редакції 03 квітня 2020 року

Measurement of Piezoelectric Characteristics of Diode Structures Using the «Obzor-103» Vector Analyzer

O. S. Tsybul'skyi^f, ORCID [0000-0002-4941-0057](https://orcid.org/0000-0002-4941-0057)

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

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)
Kyiv, Ukraine

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

V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine
Kyiv, Ukraine

Abstract—The results of the study of semiconductor film heterostructures CdS-Cu₂S and CdS-ZnS-Cu₂S by the resonance-antiresonance method are presented. The semiconductor heterostructures CdS-Cu₂S and CdS-ZnS-Cu₂S applied on a molybdenum basis were used as samples. The molybdenum base was used as the first current contact. A degenerate p-type Cu₂S semiconductor was used as the second current contact. Piezoelectric devices include piezoelectric transducers, based on piezoelectric elements made of the material having a direct or reverse piezoelectric effect.

The advantages and disadvantages of resonance antiresonance have been demonstrated. Measurements of the amplitude-frequency characteristics were performed using the vector analyzer "Obzor - 103". The methods of sample research and the procedure of measurements of complex reflection and transmission coefficients with the help of measuring complex "Obzor - 103" are presented. The scheme of measurement of the complex reflection coefficient S₁₁ and the complex transmission coefficient S₂₁ of the four-pole in the 50 Ohm path is presented. Appropriate definitions of complex display and transmission coefficients are given. Using the "Obzor - 103" vector analyzer, the complex reflection coefficients of the S₁₁ samples were measured and the resonance bands from 883 to 1273 MHz were recorded.

Based on the determined values of the resonance and anti-resonance frequencies, the figure of merit of the investigated heterostructures and capacitance values were calculated. The calculation was performed using additional data obtained from the study of the samples using the emitter meter "E7-20" under conditions close to the resonance. Comparison of the calculated values shows a significant difference in the behavior of the samples based on CdS and ZnS. Compared to the capacity and figure of merit for the piezoceramic elements presented in OST II 0444-78.

The structures studied by us showed significantly lower values of quality and capacity. The much lower values of the figure of merit are explained by the fact that in our work we investigated thin-film structures rather than the volumetric piezo-ceramic elements, the values of which are given in OST II 0444-78.

The highest Q-values (~ 62) were obtained for the CdS-ZnS-Cu₂S heterostructure. For structures with CdS films, the Q-values is less than 27.94. The Q-value of 62.65 for the CdS-ZnS-Cu₂S structure is quite large, even compared to the value for a well-known piezoceramic such as CTS-19, whose Q-value is 60 and which is a bulk material. Thus, studies conducted to evaluate the piezoelectric properties of heterostructures with CdS-Cu₂S and CdS-ZnS-Cu₂S semiconductor films demonstrate the presence of the piezoelectric properties of these structures and the prospects for their development

The results obtained are new and show the prospect of research on semiconductor heterostructures for the development of new piezoelectric devices.

Keywords — amplitude-frequency characteristics; semiconductor films; heterostructures; piezoelectric properties.

