

Дослідження п'єзофототронного ефекту в плівкових структурах A_2B_6

Балашов^f К. Є., ORCID [0000-0002-7328-7087](https://orcid.org/0000-0002-7328-7087)

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

Шмирьова Л. М., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-5497-4140](https://orcid.org/0000-0001-5497-4140)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Київ, Україна

Мамикін С. В., к.фіз.-мат.н. зав. відділу, ORCID [0000-0002-9427-324X](https://orcid.org/0000-0002-9427-324X)

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 представлено результати дослідження п'єзо фототронного ефекту в гетеро структурах на основі плівок групи A_2B_6 . Об'єктом дослідження є діодні структури на основі CdS, котрі вирощені методом термічного випаровування на гнучкій молибденовій підкладинці. Зверху на плівки CdS був нанесений тонкий шар виродженого напівпровідника Cu_xS , що дозволило сформувати діодну бар'єрну структуру. Для дослідження фотодіодних властивостей було зроблено виміри вольт-амперних характеристик (ВАХ) в темновому та світловому режимах. З отриманих ВАХ було отримано, що між напівпровідниковими плівками сформовано випрямляючий бар'єр і структура має діодну характеристику. Величина зворотнього струму збільшується при освітленні. Для дослідження п'єзофототронного ефекту до діодних структур було прикладено тиск. Зміна тиску, який прикладався до зразка виконувалась за допомогою важелів з масою 10, 20, 50, 100 та 200 грам. Струм по прямій та зворотній гілці ВАХ показав збільшення як в темновому режимі вимірів, так і при освітленні, що говорить про наявність п'єзофототронного ефекту в даному гетеропереході. Розраховані значення чутливості до тиску показали, що струм по зворотній та прямій гілці ВАХ змінюється в різних інтервалах. Найбільша чутливість в діапазоні 0–77,31 спостерігається для зворотного струму без освітлення. При додатковому освітленні чутливість до тиску по зворотній гілці ВАХ зменшується та складає 0–7,73. Усі зроблені виміри показали наявність п'єзофототронного ефекту, що дозволяє створювати на основі цього гетеропереходу нові функціональні прилади для виміру тиску та величини освітленості.

Ключові слова — діодні структури; напівпровідникові плівки; вольт-амперні характеристики; п'єзофототронний ефект

I. ВСТУП

Використання матеріалів, котрі одночасно є напівпровідниками, п'єзоелектриками та мають фотоелектричні властивості дозволяє створити принципово новий клас напівпровідникових приладів, особливо в галузі сенсорики та фотовольтаїки. Тому задача розробки технологій, які дозволяють рости чи напиляти матеріали з комплексними властивостями з подальшим дослідженням та вивченням їх фізичних та електричних властивостей є актуальною. Метою представленої роботи є дослідження п'єзо фототронних властивостей діодних структур на основі напівпровідникових плівок.

Для отримання матеріалів з новими чи комплексними властивостями вирішуються наступні завдання: виконується розробка технологічних методів осадження плівкових структур чи росту кристалів; виконується низка досліджень фізичних, структурних,

оптичних, електричних властивостей отриманих матеріалів; встановлюються закономірності між технологічними чинниками та характеристиками матеріалів.

Окрім кремнію, який є основним матеріалом мікроелектроніки та електроніки, матеріали групи A_2B_6 представляють науковий та практичний інтерес завдяки фізичним властивостям, котрих не має кремній [1-2]. В першу чергу це стосується наявності п'єзоелектричного ефекту. П'єзоелектричний ефект спостерігається в кристалах деяких речовин, що володіють певною симетрією [1-2]. До найбільш поширених в природі мінералів-п'єзоелектриків відносяться кварц, турмалін, сфалерит, нефелін. Було встановлено, що плівки A_2B_6 мають п'єзоелектричні властивості, оскільки вони є нецентросиметричними [2-5]. Але наукових праць присвячених дослідженню п'єзо електричного ефекту в тонких напівпровідникових плівках групи A_2B_6 за останні 20 років майже не існує оскільки



фокус досліджень п'єзо властивостей перемістився на ріст та вивчення наноструктур (нанодротів) на основі напівпровідників цієї групи. Тому дослідження, проведені в нашій роботі, є новими та актуальними у зв'язку з можливістю подальшого застосування отриманих результатів при розробці нових приладів.

Здебільше п'єзоелектричні перетворювачі використовуються у [1-5]:

- приладах для вимірювання параметрів механічних процесів, в тому числі: сили, акустичного і швидкозмінного тиску, лінійних і кутових прискорень, а також вібрації та ударів;
- гідроакустиці і дефектоскопії як випромінювачі ультразвуку;
- приладах юстування дзеркал оптичних приладів та виконавчих елементів систем автоматики;
- смугових фільтрах, лініях затримки, перетворювачах переміщення або приєднаної маси в частоту для датчиків рівня, щільності та ін. в якості п'єзоелектричних резонаторів, що найбільш ефективно випромінюють і приймають енергію на фіксованій резонансній частоті.

Зазвичай в конструкціях п'єзоперетворювачів використовується об'ємний матеріал, що має п'єзоелектричні властивості [1-2]. На даний час найбільш широко використовуваними матеріалами є титанат барію BaTiO_3 , п'єзокераміка, метаніобат свинцю, титанат свинцю, багатошарові первоскітоподібні з'єднання, метаніобати лужних металів [1-2]. У зв'язку з тим, що йде загальна мініатюаризація електронних приладів і пристроїв, актуальним є завдання заміни об'ємних п'єзоматеріалів на тонкоплівкові матеріали. Використання плівкових матеріалів замість об'ємних надає можливість також зменшити собівартість пристроїв. Однак далеко не кожен матеріал можна отримати в плівковому виконанні. Так, наприклад, кераміку отримують за рахунок спікання порошків і в разі зменшення товщини шару керамічна плівка буде тріскатися. Тому, задача розроблення технологічних прийомів отримання плівок групи A_2B_6 , до яких відносяться CdS , CdTe , CdSe , ZnS , ZnSe , ZnO з наявним п'єзо ефектом є актуальною задачею. І, як було зазначено, нові матеріали потребують комплексного вивчення властивостей різними методами.

Серед методів дослідження наявності п'єзо ефекту є класичні методи, такі як дослідження резонансу та антирезонансу, та і нові, такі як дослідження п'єзофототронного ефекту. Суть п'єзофототронного ефекту полягає в тому, що він є ефектом потрійного зв'язку між п'єзоелектричним потенціалом поляризації (п'єзо-потенціалом), напівпровідниковими властивостями і фотозбудженням. Досліджуваний об'єкт одночасно повинен бути напівпровідником, мати

фоточутливість та мати п'єзо ефект [6-10]. В результаті цього спостерігається збільшення струму, який виникає в матеріалі не тільки при освітленні, а й при прикладанні механічних напруг (тиску чи скручуванні) [6-10].

В даній роботі об'єктом дослідження є діодні структури на основі напівпровідникових плівок групи A_2B_6 . Самі плівки CdS вирощені методом термічного випаровування на гнучкій молібденовій підкладці. Зверху на плівки CdS був нанесений тонкий шар виродженого напівпровідника Cu_xS , що дозволило сформувати діодну бар'єрну структуру.

Для дослідження п'єзофототронного ефекту було зроблено виміри вольт-амперних характеристик (ВАХ) темнових та світлових, без прикладання тиску та з прикладанням тиску.

II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Виміри ВАХ було виконано за схемою, представленою на Рис. 1.

Використовувались вольтметр В7-15 та амперметр М24. В результаті було отримано ВАХ представлені на Рис. 2:

З отриманих графіків ВАХ ми бачимо, що між напівпровідниковими плівками сформовано випрямляючий бар'єр і структура має діодну характеристику. Величина зворотного струму збільшується при освітленні. В якості джерела освітлення було використано білий світлодіод з потужністю освітлення 30 мВт/см^2 . Зміна тиску, який прикладався до зразка, виконувалась за допомогою важелів з масою 10, 20, 50, 100 та 200 грам. На графіках вісь тиску розрахована в Паскалях, як відношення сили тиску F до площі діодної структури, яка становить $0,196 \text{ см}^2$:

$$F = mg,$$

де m — маса важеля в кг, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ — стала прискорення вільного падіння.

$$P = \frac{F}{S},$$

де S — площа зразка, яка становить $0,196 \text{ см}^2$.

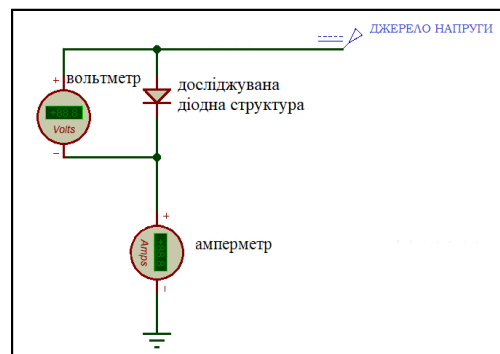


Рис. 1. Схема вимірів

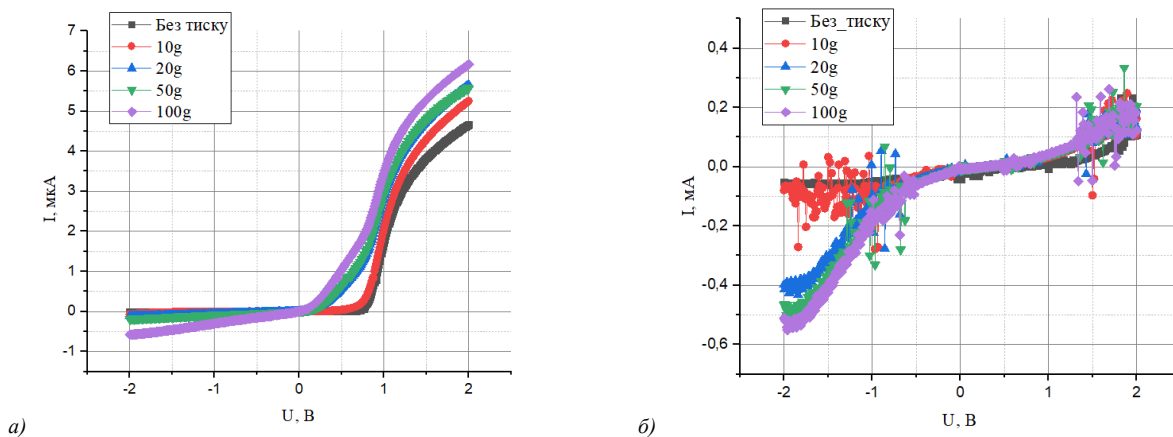


Рис. 2. ВАХ структури без освітлення (а) та з освітленням (б)

Таблиця 1. Чутливість до тиску (темнова)

Чутливість (темнова)			
<i>U = 1.7 В</i>		<i>Пряма</i>	
Без тиску	I, мкА	4,207	S= 0,00
5,01	кПа	I, мкА	4,722 S= 0,12
10,01	кПа	I, мкА	5,157 S= 0,23
25,03	кПа	I, мкА	5,141 S= 0,22
50,05	кПа	I, мкА	5,676 S= 0,35
<i>U = - 1.7 В</i>		<i>Зворотня</i>	
Без тиску	I, мкА	-0,007	S= 0,00
5,01	кПа	I, мкА	-0,032 S= 3,83
10,01	кПа	I, мкА	-0,114 S= 16,28
25,03	кПа	I, мкА	-0,168 S= 24,53
50,05	кПа	I, мкА	-0,517 S= 77,31

Таблиця 2. Чутливість структур до тиску (світлова)

Чутливість (світлова)			
<i>U = 1.7 В</i>		<i>Пряма</i>	
Без тиску	I, мкА	67,097	S= 0,00
5,01	кПа	I, мкА	143,980 S= 1,15
10,01	кПа	I, мкА	170,003 S= 1,53
25,03	кПа	I, мкА	144,154 S= 1,15
50,05	кПа	I, мкА	159,804 S= 1,38
<i>U = - 1.7 В</i>		<i>Зворотня</i>	
Без тиску	I, мкА	-57,552	S= 0,00
5,01	кПа	I, мкА	-114,232 S= 0,98
10,01	кПа	I, мкА	-396,953 S= 5,90
25,03	кПа	I, мкА	-464,038 S= 7,06
50,05	кПа	I, мкА	-502,365 S= 7,73

З отриманих результатів дослідження (див. ВАХ) отримано, що струм збільшується не тільки при освітленні, а й при прикладанні тиску. Чутливість будемо оцінювати як відношення різниці струмів при певному тиску та без нього до струму без тиску. Для оцінки чутливості структур до прикладеного тиску було зроблено наступні розрахунки:

$$S = \frac{I_T - I_0}{I_0},$$

де I_T — струм с тиском, I_0 — струм без тиску.

Результати розрахунків наведено в Таблиця 1 для прямих та зворотних гілок ВАХ без освітлення та Таблиця 2 при освітленні структур. Графіки залежностей чутливості від величини прикладеного до структури тиску показано на Рис. 3 та Рис. 4. Величини тиску наведено в кПа.

Результати вимірів ВАХ показали, що досліджені діодні структури на основі плівок CdS та Cu_xS мають п'єзофототронні властивості, а саме, підвищення струму при освітленні та прикладанні тиску. Розраховані значення чутливості до тиску показали, що струм по зворотній та прямій гілці ВАХ змінюється в різних інтервалах. Найбільша чутливість в діапазоні 0–77,31 спостерігається для зворотного струму без освітлення. При додатковому освітленні чутливість до тиску по зворотній гілці ВАХ складає 0–7,73. Зміна чутливості до величини прикладеного тиску спостерігається також на прямій гілці ВАХ. Так без освітлення S знаходиться в інтервалі 0–0,35, а при освітленні S збільшується до величин 0–1,38. Отримані результати наявності п'єзо ефекту говорять про те, що авторам вдалося знайти технологічні режими, коли ростуть плівки з нецентросиметричною структурою, в якій при прикладанні тиску генерується заряд

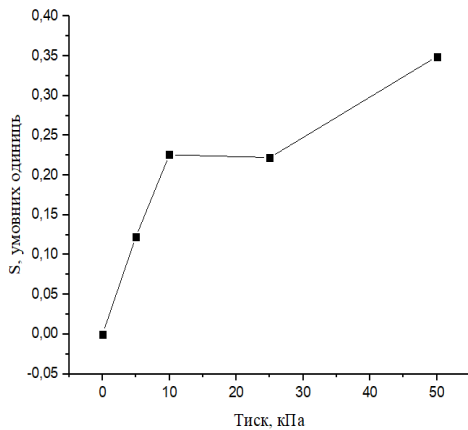


достатній для зміни як прямого, так і зворотного струмів.

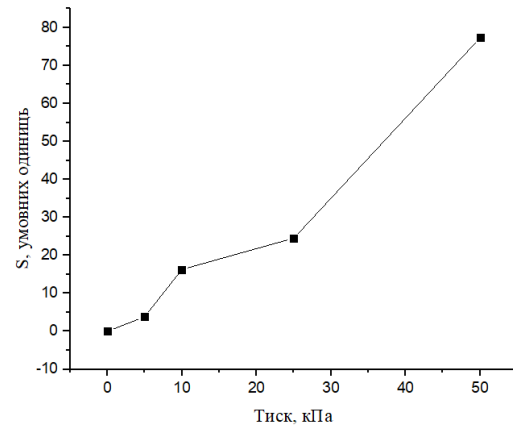
ВИСНОВКИ

Виміри ВАХ діодних структур на основі напівпровідникових плівок CdS та Cu_xS показали наявність п'єзофототронного ефекту. Найбільша чутливість до тиску (5,01 кПа–50,05 кПа) спостерігається для зворотного струму без освітлення та знаходиться в діапазоні 0–77,31. При додатковому освітленні чутливість до тиску по зворотній гілці ВАХ складає 0–7,73.

Зміна чутливості до величини прикладеного тиску спостерігається також на прямій гілці ВАХ. Так, без освітлення чутливість знаходиться в інтервалі 0–0,35, а при освітленні чутливість збільшується до величин 0–1,38. Збільшення величини чутливості при освітленні є підтвердженням наявності комплексних властивостей в досліджуваному гетеропереході, що дозволяє створювати на основі цього гетеропереходу нові функціональні прилади для виміру тиску та величини освітленості.

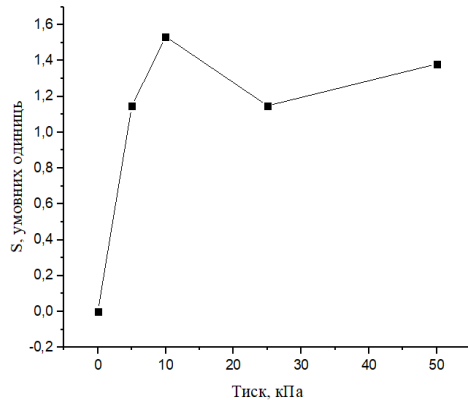


а)

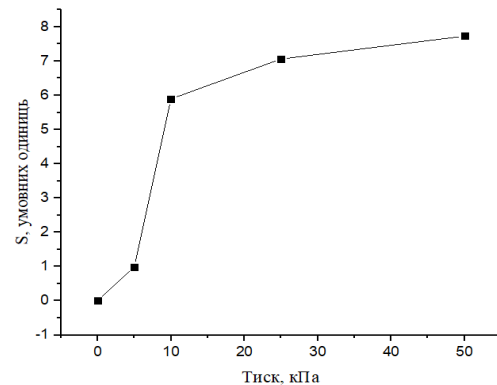


б)

Рис. 3. Графіки залежностей чутливості від прикладеного тиску у випадку без освітлення для прямої гілки ВАХ (а) та зворотної гілки ВАХ (б)



а)



б)

Рис. 4. Графіки залежностей чутливості від прикладеного тиску у випадку з освітленням для прямої гілки ВАХ (а) та зворотної (б)

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Sagatelyan G.R. «Technologiya izgotovleniya piezoelektricheskikh preobrazovately dlya aparatov ultrazvukovoi terapii, diagnostiki i hirurgii [Piezoelectric transducer manufacturing technology for ultrasound therapy, diagnostics and surgery devices]»: *Uchebnoe posobie po kursu "Technologiya priborostroeniya"*. Izdatelstvo MGTU, 1993, ISBN: 5-7038-0949-5
- [2] Yanych V. V. «Piezoelektricheskie vibroizmiritelnye preobrazovately (akselerometry): monografiya [Piezoelectric vibration transducers (accelerometers): monography]», Rostov – Na – Donu, Izdatelstvo IUFU, 2010, ISBN: 978-5-9275-0728-3
- [3] Antonio Arnau. «Piezoelectric-Transducers-and-Applications, Second Edition», *Berlin Heidelberg*, 2008, DOI: [10.1007/978-3-540-77508-9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77508-9)
- [4] Zhong Lin Wang. «Progress in Piezotronics and Piezo-Phototronics», *Advanced Materials*, vol.24, pp.4632-4646, 2012, DOI: [10.1002/adma.201104365](https://doi.org/10.1002/adma.201104365)
- [5] Mechanosensation. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mechanosensation>
- [6] Xingfu Wang, Wenbo Peng, Caofeng Pan, Zhong Lin Wang. «Piezotronics and piezo-phototronics based on a-axis nano/microwires: fundamentals and applications», *Semicond. Sci. Technol.*, vol.32, pp.043005-043021, 2017, DOI: [10.1088/1361-6641/aa5fcd](https://doi.org/10.1088/1361-6641/aa5fcd)
- [7] Wang Z L. «Progress in piezotronics and piezo-phototronics», *Adv. Mater.*, vol.24, pp.4632–4678, 2012 DOI: [10.1002/adma.201104365](https://doi.org/10.1002/adma.201104365)
- [8] Wang Z L. «Piezopotential gated nanowire devices: piezotronics and piezo-phototronics», *Nano Today*, vol.5, pp.540–592, 2010, DOI: [10.1016/j.nantod.2010.10.008](https://doi.org/10.1016/j.nantod.2010.10.008)
- [9] Wang Z L. «From nanogenerators to piezotronics—a decade-long study of ZnO nanostructures», *MRS Bull.*, vol.37, pp.814–841, 2012, DOI: [10.1557/mrs.2012.186](https://doi.org/10.1557/mrs.2012.186)
- [10] Yamabi S and Imai H «Growth conditions for wurzite zinc oxide films in aqueous solutions», *J. Mater. Chem.*, vol.12, pp.3773–3781, 2002, DOI: [10.1039/B205384E](https://doi.org/10.1039/B205384E)

UDC 53.082.73, 622.377.6, 666.655, 681.11.032.32, 681.586.35, 681.586.48

The Research of Piezo Phototron Effect in A_2B_6 Film Structures

K. Ie. Balashov^f, ORCID [0000-0002-7328-7087](https://orcid.org/0000-0002-7328-7087)V. A. Klimenko, ORCID [0000-0002-6035-5511](https://orcid.org/0000-0002-6035-5511)L. M. Shmyrova, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0001-5497-4140](https://orcid.org/0000-0001-5497-4140)National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Kyiv, UkraineS. V. Mamykin, PhD(Phys.-Math.) head of department, ORCID [0000-0002-9427-324X](https://orcid.org/0000-0002-9427-324X)T. V. Semikina^g, 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 paper presents the results of the study of a piezo phototron effect in hetero structures based on A_2B_6 films. The field of study of the piezo phototron effect in semiconductor thin films is new. The use of materials that have several properties at the same time, namely semiconductors, piezoelectrics and photoelectric properties, allows us to create a fundamentally new class of semiconductor devices, especially in the field of sensors and photovoltaics. Obtaining films of the A_2B_6 group, which include CdS, CdTe, CdSe, ZnS, ZnSe, ZnO with an existing piezoelectric effect, is an urgent task. In this work, the object of study is diode structures based on them. Namely, CdS films were grown by thermal evaporation on a flexible molybdenum substrate. A thin layer of degenerate Cu₃S semiconductor was deposited on top of the CdS films, which allowed it to form a diode barrier structure. For the study of photodiode properties, measurements were made of the current-voltage characteristics (VAC) in the dark and light modes. Measurements were made using a power source, a voltmeter and an ammeter. The limits of voltage measurements ranged from -2 V to 2 V to prevent possible breakdown of structures. A white LED with a power output of 30mW / cm² was used as the light source. From the obtained CVCs it was obtained that a rectifying barrier is formed between the semiconductor films and the structure has a diode characteristic. The magnitude of the reverse current increases during illumination. Pressure was applied to the diode structures to investigate the piezoelectric effect. The pressure applied to the sample was changed by means of levers weighing 10, 20, 50, 100 and 200 grams. As a result of the measurements of the CVC during the application of pressure, it was found that the current on the forward and reverse branches of the CVC showed an increase in both the dark mode of measurement and in the light. This indicates the presence of a piezoelectric effect in this heterojunction. The calculated values of the sensitivity to pressure showed that the current on the back and forward branches of the CVC changes at different intervals. The highest sensitivity in the range 0–77.31 absolute units is observed for reverse current without illumination. With additional illumination, the sensitivity to the pressure on the back branch of the CVC decreases and is 0–7.73. All measurements made show the presence of a piezophototron effect, which allows the creation of new functional devices for measuring pressure and luminance based on this heterojunction.

Keywords — diode structures; semiconductor films; volt-ampere characteristics; piezoelectric effect

