



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **153828** (13) **U**  
(51) МПК (2023.01)  
**G01T 1/00**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ  
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: <b>u 2022 04623</b>	(72) Винахідник(и): <b>Курбатов Денис Ігорович (UA), Знаменщikov Ярослав Володимирович (UA), Д'яченко Олексій Вікторович (UA)</b>
(22) Дата подання заявки: <b>07.12.2022</b>	(73) Володілець (володільці): <b>СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, буд. 2, м. Суми, 40007 (UA)</b>
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>07.09.2023</b>	(74) Представник: <b>ГУДКОВ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ</b>
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>06.09.2023, Бюл.№ 36</b>	

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ПРИДАТНОСТІ ПЛІВКОВИХ ДЕТЕКТОРІВ ЯК МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ДЕТЕКТОРІВ РАДІАЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### (57) Реферат:

Спосіб визначення придатності плівкових детекторів як матеріалу для детекторів радіаційного випромінювання включає спочатку розміщення плівкового детектора у закритому боксі без світла, вимірювання темнових вольт-амперних характеристик. Після цього плівковий детектор піддають випромінюванню джерелом світла білого кольору з потужністю випромінювання  $P_L=3,5-91,9$  мВт/см<sup>2</sup> і вимірюють світлові вольт-амперні характеристики та розраховують відношення:

$$R_J = J_{\text{light}} / J_{\text{dark}},$$

де  $J_{\text{light}}$  - густина струму під дією світла,

$J_{\text{dark}}$  - густина струму в темноті.

Після отримання даних, зразки, що показали відношення  $R_J$  більше 2, вважають придатними як матеріал для детекторів радіаційного випромінювання, причому, чим більше значення  $R_J$ , тим кращої якості одержаний детекторний зразок, а за відсутності фотовідклику зразка ( $R_J \sim 1$ ) зразок відбраковують.

UA 153828 U



Корисна модель належить галузі матеріалознавства, зокрема до способу визначення придатності плівкових детекторів як матеріалу для детекторів радіаційного випромінювання та створення приладів електроніки (детекторів радіаційного випромінювання).

5 За останні кілька десятиліть напівпровідникові детектори ядерного випромінювання пережили досить швидкий розвиток. Основною характеристикою цього типу детекторів є здатність перетворювати  $\gamma$ -промені безпосередньо в електронні сигнали. Падаюче гамма-випромінювання взаємодіє з напівпровідником і збуджує електронно-діркові пари, які пропорційні вкладеній енергії, і розходяться під дією прикладеного електричного поля. Електрони дрейфують до анода, а дірки - до катода. Сигнал заряду індукується на електродах детектора рухомими носіями заряду. Саме завдяки прямому перетворенню відкладення енергії шляхом взаємодії гамма-випромінювання в електричний сигнал напівпровідниковий детектор може легко досягти високої енергетичної та просторової роздільної здатності.

10 Електромагнітне випромінювання, таке як рентгенівське та гамма-промені, може взаємодіяти з твердотільним детектором за допомогою чотирьох механізмів [1]. Це пружне розсіювання, фотоелектричне поглинання, комптонівське розсіювання, утворення пар. Саме фотоелектричне поглинання в більшості випадків є ідеальним процесом для роботи детектора. У цьому процесі вся енергія падаючого фотона поглинається одним із орбітальних електронів атомів матеріалу детектора. Потім цей фотоелектрон втрапить кінетичну енергію, яку він набув через колумбівські взаємодії з решіткою напівпровідника, утворюючи багато пар електрон-дірка. 20 Виявлення цих зарядів у вигляді імпульсу струму за допомогою зовнішнього контуру дозволяє створити гістограму висот імпульсів, спектр висот імпульсів, з піком, спричиненим цією взаємодією, який називається фотопіком.

Розробка детекторів радіаційного випромінювання вимагає розробки тестових систем для вибору та характеристики зразків рівня детектора, вивчення продуктивності детектора та оптимізації геометрії контакту, складу та технологічних умов одержання зразка. Тестовим системам потрібні висококолімовані джерела випромінювання (альфа-частинки або джерела рентгенівського випромінювання, рентгенівські трубки, лазерні промені) для створення надлишкових носіїв в об'ємі або на поверхні таких детекторів. Вимірювання в таких системах відбувається в вакуумних камерах з різними джерелами радіаційного випромінювання. Тому дослідження детекторних зразків в таких тестових системах є високоартісною процедурою, що вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу такої системи.

30 При складності та коштовності таких досліджень існує ймовірність того, що дослідний детекторний зразок взагалі не покаже ніякої реакції на джерело радіаційного випромінювання. Тому, як процедура попереднього відбору радіаційно активних дослідних зразків може застосовуватися вимірювання фоточутливості плівкових детекторів. Ця процедура забезпечить швидкий відбір дослідних детекторних зразків і є відносно дешевою.

35 З аналізу форми сигналу фотовідклику детектора, одержаного при його опроміненні пульсуючим світлом або лазерним випромінюванням, може бути одержана певна інформація про властивості детекторного матеріалу, зокрема час життя та рухливість носіїв заряду [2], [3].

40 У роботах [4-6] показано, що цілий ряд характеристик детекторів жорсткого випромінювання можуть бути знайдені при заміні рентгенівського та гамма-випромінювання освітленням звичайним білим світлом, оскільки дія цих випромінювань фізично подібна.

45 Так, автори у роботі [5] проводили вимірювання ВАХ одного діода Шотткі Au/CdZnTe прикладаючи напругу в діапазоні від -15 В до 20 В. Визначили, що щільність струму витоку становить  $8,77 \text{ нА/мм}^2$  при прикладеній напрузі зворотного зміщення 15 В. Такі характеристики як заборонена зона, дефекти та контакт електродів, можна покращити для зменшення струму витоку. Для ультрафіолетового детектора вкрай необхідно подальше зменшення струму витоку. Після цього було проведено оптичний відгук під ультрафіолетовим освітленням ( $\lambda = 260 \text{ нм}$ ) та визначена щільність струму  $1508,69 \text{ нА/мм}^2$  при напрузі зміщення 15 В після освітлення, що становить два порядки величина більша, ніж у темних умовах. Зміна щільності струму пов'язана зі збільшенням фотогенерованих діодних носіїв. Що підтверджує досить велику чутливість до ультрафіолетового світла полікристалічного CdZnTe товстого плівкового діода Шотткі. З подальшим вдосконаленням властивостей матеріалу та характеристик діода, яке продовжується, можна досягти більш високої чутливості та збільшеної ефективності детектора. 50 Таким чином можна відмітити, що за результатами вимірювання ВАХ можна прогнозувати роботу детекторного зразка як детектора ультрафіолетового випромінювання.

55 Автори роботи [4] також проводять співставлення електричних вимірювань до ефективності детекторного зразка. Вимірюючи електричний відгук детектора як в темряві так і при білому світлі та визначають, що реакція зразків на світло є хорошою. Струм витоку на світлі в 100 разів 60 більший, ніж у темряві, а ємність збільшується майже в два рази. Виміряна ємність становить

близько 10-12 Ф. Питомий опір, розрахований на основі вимірювання ВАХ для CZT-1-ev і CZT-21-2 відповідно становить  $7,20 \cdot 10^{10}$  Ом см і  $2,62 \cdot 10^{10}$  Ом см. Після чого досліджують спектроскопічні реакції на гамма-випромінювання зразків за допомогою стандартного джерела  $\text{Am}^{241}$ . В результаті наводять залежність радіаційного відгуку від напруги. Розрахований за допомогою гамма-спектроскопії  $\text{Am}^{241}$  значення становить  $4,9 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/В. для першого зразка, CZT-1-ev та  $1,1 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/В, для CZT-21-2.

Однак, в цих роботах автори не встановили кореляцію між фоточутливістю та радіаційним відгуком досліджуваних детекторних зразків.

В основу корисної моделі поставлено задачу створення способу визначення придатності плівкових детекторів як матеріалу для детекторів радіаційного випромінювання шляхом встановлення результатів вимірювання фоточутливості як критерію оцінки властивостей детекторного матеріалу.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі спосіб визначення придатності плівкових детекторів як матеріалу для детекторів радіаційного випромінювання, що включає спочатку розміщення плівкового детектора у закритому боксі без світла, вимірювання темнових вольт-амперних характеристик, після чого плівковий детектор піддають випромінюванню джерелом світла білого кольору з потужністю випромінювання  $P_L=3,5-91,9$  мВт/см<sup>2</sup> і вимірюють світлові вольт-амперні характеристики та розраховують відношення:

$$R_J = J_{\text{light}} / J_{\text{dark}},$$

де  $J_{\text{light}}$  - густина струму під дією світла,

$J_{\text{dark}}$  - густина струму в темноті,

після отримання даних, зразки, що показали відношення  $R_J$  більше 2, вважають придатними як матеріал для детекторів радіаційного випромінювання, при чому, чим більше значення  $R_J$ , тим кращої якості одержаний детекторний зразок, а при відсутності фотовідклику зразка ( $R_J \sim 1$ ), зразок відбраковують.

Завдяки використанню способу визначення фоточутливості плівкових детекторів як критерію оцінки їх придатності як матеріалу для детекторів радіаційного випромінювання зразок піддається впливу світла та відбувається вимірювання струму, що сприяє відбору радіаційно активних зразків та зменшення кількості вимірювань непридатних плівкових детекторів і, як наслідок, зменшення кількості пусків вартісного обладнання.

Таким чином, до способу визначення придатності плівкових детекторів як матеріалу для детекторів радіаційного випромінювання, що заявляється, у сукупності з усіма істотними ознаками, включаючи відмінні, забезпечує можливість попереднього відбору детекторно-активних зразків та зменшення кількості вимірювань непридатних плівкових детекторів і, як наслідок, зменшення кількості пусків вартісного обладнання.

Спосіб пояснюється кресленнями, де:

- на фіг. 1 показано маркування контактів зразка CZT.A3 (1, 2, 3 - контакти верхнього шару, П - контакт підкладки);

- на фіг. 2 показана характеристики "напруга - густина струму" детектора на основі сандвіч-структур ITO/CZT/Au в темноті та при освітленні білим світлом з різною потужністю  $P_L$ : темнові умови (1), 3,5 мВ/см<sup>2</sup> (2), 5,7 мВ/см<sup>2</sup> (3), 29,9 мВ/см<sup>2</sup> (4), 53,7 мВ/см<sup>2</sup> (5), 91,9 мВ/см<sup>2</sup> (6)

- на фіг. 3 представлені часова діаграма відклику детекторного зразка жорсткого випромінювання на основі полікристалічних плівок CZT ("CZT.A3") на радіаційне випромінювання.

Спосіб здійснюється наступним чином.

Готують детекторні зразки будь яким фізичним або хімічним методом, з нанесеними контактами. Вимірюваний зразок поміщають у закритий бокс без світла та залишають на 5 хв. Далі, проводять вимірювання темнових вольт-амперних характеристик та струму витоку при напругах в діапазоні -100-100 В. Після цього зразок піддається випромінюванню джерелом білого світла інтенсивністю  $P_L=3,5-91,9$  мВт/см<sup>2</sup> та проводять вимірювання світлових вольт-амперних характеристик та струму витоку при тих же параметрах. На основі отриманих результатів проводиться оцінки їх придатності як матеріалу для детекторів радіаційного випромінювання. При цьому критерієм, за яким проводилася оцінка фоточутливості детекторів, вважалось відношення  $R_J$  значення густини струму  $J_{\text{light}}$  під дією світла до густини струму  $J_{\text{dark}}$  в темноті ( $R_J = J_{\text{light}} / J_{\text{dark}}$ ). Зразки, що показали відношення  $R_J$  більше 2 при потужності випромінювання можна вважати працездатними. При чому чим більше значення  $R_J$  тим кращої якості одержаний детекторний зразок. При відсутності фотовідклику зразка ( $R_J \sim 1$ ), зразок відбраковують. В подальшому відібрані, детекторні зразки встановлюють в вимірювальну камеру та проводять вимірювання за допомогою радіаційного випромінювання.

Приклад конкретного виконання способу.

Детектори жорсткого випромінювання являють собою багат шарову структуру з фото чутливим шаром CZT та струмопровідними контактами до нижньої та верхньої поверхні цього шару. На струмопровідну підкладку за допомогою методу термічного випарування у квазізамкненому об'ємі осаджуються шари активного матеріалу (CdZnTe). Одержано

5 детекторний зразок "CZT.A3.

Для вимірювання ВАХ зразків застосовувався пікоамперметр KEITHLEY 6487 із вбудованим джерелом напруги. Вимірювання проводилися для пар контактів: 1-П, 2-П, 3-П (Фіг. 1). Зразок поміщали у закритий бокс, витримувався 5 хв в темряві, а потім проводилося вимірювання темнових вольт-амперних характеристик та струму витоку при напругах в діапазоні від -100 до 100В. Після чого, зразок піддається випромінюванню джерелом білого світла інтенсивністю  $P_L=3,5$  мВт/см<sup>2</sup> та проводять вимірювання світлових вольт-амперних характеристик та струму витоку при тих же параметрах. На основі отриманих результатів розраховується відношення  $R_J=J_{light}/J_{dark}$ . Досліджуваний зразок показав значення  $R_J=2,4$ . Такий зразок вважається працездатними.

15 Далі проведено вимірювання амплітудних розподілів сигналу детекторного зразка під впливом джерел альфа та бета-випромінювання. Для порівняння, як еталонний детектор, використовувався поверхнево-бар'єрний кремнієвий детектор ДКПс-500-І. Вимірювання проводилися за кімнатної температури. Для реєстрації альфа-випромінювання детектор встановлювався в вимірювальній камері, спільно з джерелом альфа-випромінювання Pu-239 (1П9-634.90), потім камера відкачувалася до значення - 0,86 кгс/см<sup>2</sup>.

20 Додатково проведено дослідження відгуку плівки CdZnTe 10.14 на інтенсивне рентгенівське випромінювання. Використовувалася рентгенівська трубка "Mini-X USB Controlled X-Ray Tube" (Amptek), напруга трубки була встановлена 50 кВ, струм - 80 мкА, відстань до зразка становила ~ 30 см. Приблизне значення дози випромінювання у цій точці ~ 1 Зв/год. (технічна документація до трубки), похибка вимірювань не визначалася.

25 Вимірювання струму зразка проводилися пікоамперметром KEITHLEY 6485. За дії радіаційного випромінювання значення сили струму детекторів ( $I_{expos}=8,39 \times 10^{-7}$  А) було більшим, ніж сила струму за відсутності випромінювання ( $I_{dark}=8,20 \times 10^{-7}$  А). Зміна фотоструму зразка при включенні та вимкненні рентгенівської трубки наведено на фіг. 3. Визначено, що струм зразка змінюється, при вмиканні/вимиканні та тривалості роботи рентгенівської трубки. Дослідження темнових та світлових ВАХ, а також розподіл сигналу альфа- та бета-випромінювання показали кореляцію між фотовідгуком та відгуком на радіаційне випромінювання, і з допомогою фігур показують наступне:

35 - маркування контактів досліджуваного детекторного зразка CdZnTe 10.3 (1,2,3 - контакти верхнього шару, П - контакт підкладки) (фіг. 1);

- характеристики "напруга - густина струму" детектора на основі сандвіч-структур ITO/CZT/Au в темноті та при освітленні білим світлом з різною потужністю PL: темнові умови (1), 3,5 мВ/см<sup>2</sup> (2), 5,7 мВ/см<sup>2</sup> (3), 29,9 мВ/см<sup>2</sup> (4), 53,7 мВ/см<sup>2</sup> (5), 91,9 мВ/см<sup>2</sup> (6) (фіг. 2)

40 часова діаграма відклику детекторного зразка жорсткого випромінювання на основі полікристалічних плівок CZT ("CZT.A3") на радіаційне випромінювання (фіг. 3).

Таким чином, розроблений спосіб дозволяє визначити придатність плівкових детекторних зразків простим та відносно дешевим методом та провести відбір радіаційно активних зразків детекторів перед дослідженням їх на високовартісній та вимогливій до кваліфікації системі вимірювання.

45 Джерела інформації:

1. T.E. Schlesinger et al., "Cadmium Zinc Telluride and Its Use as A Nuclear Radiation Detector Material," Mater. Sci. Eng., 2001. Vol. 32. - P. 103-189.

2. A.E. Bolotnikov, S.E. Boggs, W.R. Cook III, F.A. Harrison, and S.M. Schindler, "Use of a pulsed laser to study properties of CdZnTe pixel detectors," Penetrating Radiat. Syst. Appl., 1999. - Vol. 3769. - P. 52-58.

3. J.C. Erickson, H.W. Yao, R.B. James, H. Hermon, and M. Greaves, "Time of flight experimental studies of CdZnTe radiation detectors," J. Electron. Mater., 2000. - Vol. 29, no. 6. - P. 699-703.

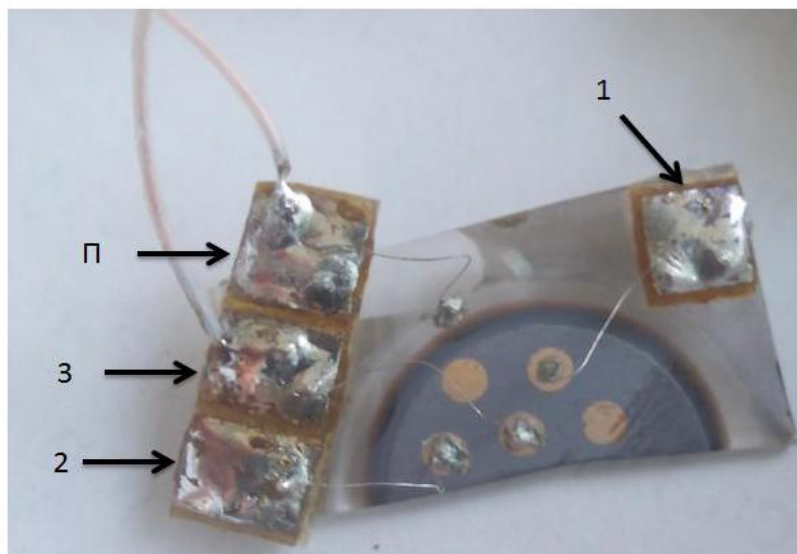
4. R. Gul, Z. Li, R. Rodriguez, K. Keeter, a. Bolotnikov, and R. James, "Defect measurements of CdZnTe detectors using I-DLTS, TCT, I-V, C-V and  $\gamma$ -ray spectroscopy," Proc. SPIE, vol. 7079, no. March, pp. 70790U-70790U-8, 2008.

5. L. Cai et al., "Preparation of polycrystalline CdZnTe thick film Schottky diode for ultraviolet detectors," Vacuum, 2013. - Vol. 88, no. 1. - P. 28-31.

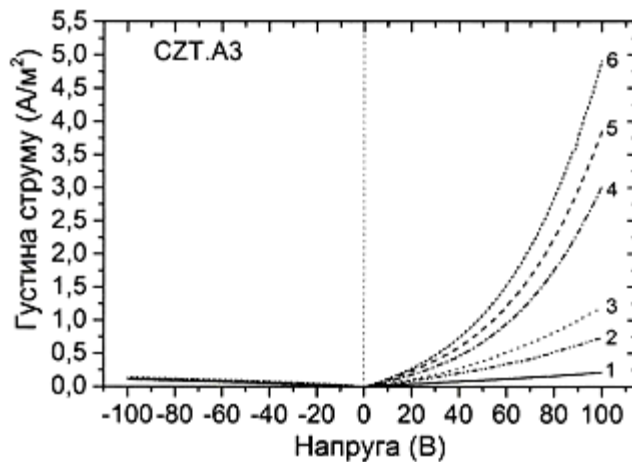
6. G. Li, W. Jie, H. Hua, and Z. Gu, "Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te-Growth-and-characterization-of-crystals-for-X-ray-and-gamma-ray-detectors\_2003\_Progress-in-Crystal-Growth-and-Characterization-of-Materials.pdf," 2004. - No. 2003. - P. 85-104.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

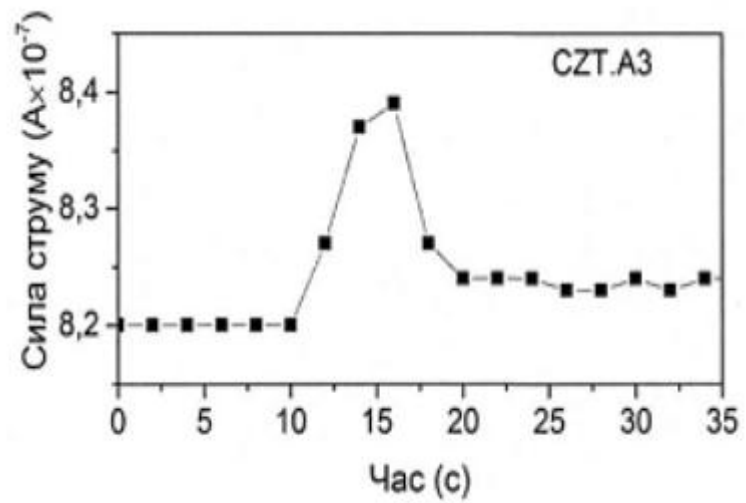
- 5 Спосіб визначення придатності плівкових детекторів як матеріалу для детекторів радіаційного випромінювання, що включає спочатку розміщення плівкового детектора у закритому боксі без світла, вимірювання темнових вольт-амперних характеристик, після чого плівковий детектор піддають випромінюванню джерелом світла білого кольору з потужністю випромінювання  $P_L=3,5-91,9$  мВт/см<sup>2</sup> і вимірюють світлові вольт-амперні характеристики та розраховують відношення:
- 10  $R_J=J_{light}/J_{dark}$ ,  
де  $J_{light}$  - густина струму під дією світла,  
 $J_{dark}$  - густина струму в темноті,  
після отримання даних, зразки, що показали відношення  $R_J$  більше 2, вважають придатними як матеріал для детекторів радіаційного випромінювання, причому, чим більше значення  $R_J$ , тим кращої якості одержаний детекторний зразок, а за відсутності фотовідклику зразка ( $R_J \sim 1$ ) зразок відбраковують.
- 15



Фіг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3