

Корисна модель належить до галузі напівпровідникової електроніки, оптоелектроніки та радіотехніки, зокрема до конструкцій фотодіодів, призначених для перетворення оптичного випромінювання в електричний сигнал у височастотних електронних та оптоелектронних пристроях.

Відомі височастотні фотодіоди переважно виконують на основі монокристалічного кремнію, германію, телуриду кадмію або епітаксійних шарів напівпровідникових сполук. Такі фотодіоди можуть забезпечувати необхідні фоточутливі та електричні характеристики, однак їх конструкція зазвичай пов'язана з використанням жорсткої напівпровідникової основи або складної епітаксійної структури, що обмежує можливість формування гнучких планарних фоточутливих елементів та їх інтеграції у приладові структури на гнучких або неплоских поверхнях.

Перспективним матеріалом для фоточутливого шару є телурид кадмію, який може бути використаний у тонкоплівкових напівпровідникових структурах. Водночас відомі тонкоплівкові структури на основі телуриду кадмію переважно застосовуються у сонячних елементах або детекторах випромінювання, а не як гнучкі планарні височастотні фотодіоди з малою фоточутливою ділянкою та планарним розміщенням електродів.

Тому створення гнучкого височастотного планарного плівкового фотодіода на основі телуриду кадмію, конструкція якого забезпечує розміщення фоточутливої напівпровідникової структури на гнучкій поліімідній підкладці, формування планарних електродів та можливість інтеграції такого фотодіода у планарні приладові структури є актуальним.

Відомий фоточутливий напівпровідниковий прилад у вигляді гомоепітаксійної р-і-п діодної структури на основі телуриду кадмію, призначений для використання як детектор ядерного випромінювання [1]. Прилад містить діодну структуру на основі CdTe з епітаксійними шарами та забезпечує реєстрацію випромінювання.

Недоліком відомого приладу є те, що він призначений переважно для детектування ядерного випромінювання та виконаний як епітаксійна структура на основі CdTe, яка не передбачає формування гнучкого планарного плівкового фотодіода на поліімідній підкладці. Така конструкція не забезпечує можливості розміщення фоточутливої структури на гнучких або неплоских поверхнях і не орієнтована на інтеграцію у гнучкі планарні приладові структури.

Відомий фотодіод на основі гетероструктури р-ZnTe/n-CdTe [2], конструкція якого містить шар р-типу ZnTe, шар n-типу CdTe та сформований між ними р-п гетероперехід. Така будова забезпечує фоточутливість і випрямляючі властивості напівпровідникової структури.

Недоліком даного фотодіода є те, що він не виконаний як гнучкий планарний плівковий фотодіод, не містить гнучкої поліімідної підкладки та не передбачає планарного розміщення електродів із формуванням малої фоточутливої ділянки. У зв'язку з цим відома структура не забезпечує конструктивної придатності для розміщення на гнучких поверхнях і не вирішує задачу інтеграції височастотного фотодіода у гнучкі планарні приладові структури.

Водночас відомі технічні рішення щодо формування тонкоплівкових структур на основі CdTe на гнучких підкладках, зокрема гнучкі CdTe сонячні елементи на поліімідних і гнучких скляних підкладках [3], а також спосіб формування базових шарів телуриду кадмію для гнучких сонячних елементів [4]. Ці джерела підтверджують технологічну можливість використання CdTe-плівок у гнучких напівпровідникових структурах, однак не розкривають конструкцію гнучкого планарного височастотного фотодіода з фоточутливою структурою на основі CdTe, розміщеною на поліімідній підкладці.

Найбільш близьким аналогом є промисловий кремнієвий р-і-п фотодіод серії S9055 [5], призначений для приймання оптичного випромінювання та перетворення його в електричний сигнал. Фотодіоди зазначеної серії виконані на основі монокристалічного кремнію, мають р-і-п структуру, малу ємність переходу та призначені для роботи у швидкодіючих оптоелектронних схемах. Згідно з технічними характеристиками, фотодіоди серії S9055 мають активну фоточутливу площу в діапазоні 10^4 - 10^5 мкм², спектральну чутливість у видимій та ближній інфрачервоній області, низький темновий струм та малу електричну ємність, що забезпечує можливість їх використання як височастотних фотоприймальних елементів.

Недоліком найближчого аналога є те, що він виконаний на основі монокристалічного кремнію та не є гнучкою плівковою планарною структурою. Конструкція найближчого аналога не передбачає використання гнучкої поліімідної підкладки, фоточутливого шару телуриду кадмію, шарів ITO і ZnTe у складі тонкоплівкової структури та планарної конфігурації електродів на гнучкій основі. Це обмежує можливість розміщення фотодіода на гнучких або неплоских поверхнях, ускладнює інтеграцію у планарні приладові структури та не забезпечує зменшення матеріалоємності за рахунок використання тонкоплівкової CdTe-структури.

Таким чином, відомі аналоги не забезпечують у сукупності створення гнучкого планарного плівкового фотодіода на основі телуриду кадмію, придатного для інтеграції у планарні приладові структури та розміщення на гнучких або неплоских поверхнях при збереженні електричних і фоточутливих характеристик, співмірних з характеристиками промислових кремнієвих р-і-п фотодіодів аналогічної активної площі.

В основу корисної моделі поставлено задачу створення гнучкого планарного високочастотного фотодіода на основі телуриду кадмію, конструкція якого забезпечує розміщення фоточутливої напівпровідникової структури на гнучкій поліімідній підкладці, формування планарної конфігурації електродів, можливість інтеграції фотодіода у планарні приладові структури та зменшення матеріалоемності при збереженні фоточутливих і електричних характеристик, придатних для високочастотного застосування.

Вирішення поставленої задачі досягається тим, що гнучкий планарний високочастотний фотодіод на основі телуриду кадмію містить напівпровідникову структуру з фоточутливим шаром та електродами для відведення фотогенерованих носіїв заряду, при цьому фотодіод містить гнучку прозору підкладку з термостабільного полііміду, на фронтальній стороні якої розміщена планарна плівкова напівпровідникова структура $n^+ \text{-ITO/i-CdTe/p}^+ \text{-ZnTe}$, причому між поліімідною підкладкою та фоточутливим шаром $i\text{-CdTe}$ розміщений шар сульфід кадмію, а між фоточутливим шаром $i\text{-CdTe}$ та шаром $n^+ \text{-ITO}$ розміщений прошарок нелегованого оксиду цинку. Поліімідна підкладка виконана товщиною 7 мкм, шар сульфід кадмію виконаний товщиною 0,1 мкм, прошарок нелегованого оксиду цинку виконаний товщиною 0,1 мкм, а фоточутливий шар $i\text{-CdTe}$ виконаний товщиною 3 мкм. Фоточутливий шар $i\text{-CdTe}$ має довжину 5 мкм і ширину 0,5 см, при цьому площа фоточутливої поверхні становить 25000 мкм², а загальна товщина приладової структури разом із поліімідною підкладкою становить 10 мкм.

Таке конструктивне виконання забезпечує можливість розміщення високочастотного фотодіода на гнучких або неплоских поверхнях, інтеграції у планарні приладові структури, зменшення товщини та матеріалоемності фоточутливої структури, а також отримання електричних і фоточутливих характеристик, придатних для використання у високочастотних оптоелектронних пристроях.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями:

на фіг. 1 зображено конструкцію гнучкого планарного високочастотного фотодіода на основі телуриду кадмію, де:

- 1 - поліімідна підкладка;
- 2 - шар сульфід кадмію товщиною 0,1 мкм;
- 3 - шар телуриду кадмію товщиною 3 мкм;
- 4 - шар ZnO товщиною 0,1 мкм;
- 5 - шар $n^+ \text{-ITO}$ товщиною 3 мкм;
- 6 - шар $p^+ \text{-ZnTe}$ товщиною 3 мкм;
- 7 - мідні електроди;

на фіг. 2 наведено типову експериментальну спектральну залежність фоточутливості фотодіода $n^+ \text{-ITO/i-CdTe/p}^+ \text{-ZnTe}$ порівняно з промисловим зразком високочастотного фотодіода з аналогічною активною площею на основі кремнію [5];

на фіг. 3 наведено типову експериментальну залежність електричної ємності фотодіода $n^+ \text{-ITO/p-CdTe/p}^+ \text{-ZnTe}$ від зворотної напруги при частоті 1 МГц порівняно із промисловим зразком високочастотного діода з аналогічною активною площею [5] на основі кремнію;

на фіг. 4 наведено типову експериментальну залежність темного струму фотодіода $n^+ \text{-ITO/p-CdTe/p}^+ \text{-ZnTe}$ від зворотної напруги у порівнянні із промисловим зразком високочастотного діода з аналогічною активною площею [5] на основі кремнію.

Пропонована конструкція відрізняється тим, що напівпровідникова структура $n^+ \text{-ITO/i-CdTe/p}^+ \text{-ZnTe}$ виконана у вигляді планарної плівкової структури на гнучкій поліімідній підкладці, а для закріплення фотодіода на поверхні приладової структури на тильній стороні поліімідної підкладки може бути розміщений клейовий шар. Ідеальна зонна діаграма гетероструктури $n^+ \text{-ITO/i-CdTe/p}^+ \text{-ZnTe}$ була побудована на основі даних про енергетичну структуру ITO [6], CdTe та ZnTe [7, 8].

Для переходу $p^+ \text{-ZnTe/p-CdTe}$ згідно з розрахунками маємо контактну різницю потенціалів: $\phi_{\text{ср-p}} \approx 0,27$ eV і утворення шару збагачення в CdTe. Ширина цього шару (l_p) порядку дебаївського радіуса в CdTe:

$$l_p = \sqrt{2r_d} = (2\epsilon_0 \epsilon_{\text{CdTe}} k_B T / e^2 p_0)^{1/2} \approx 0,55 \text{ мкм}. \quad (1)$$

Для переходу $p\text{-CdTe/n}^+ \text{-ITO}$ маємо контактну різницю потенціалів: $\phi_{\text{ср-n}} \approx 1$ eV і утворення інверсного шару в CdTe і шару збіднення. Ширину інверсного шару ($l_{\text{n-inv}}$) можна оцінити зазначенням дебаївського радіуса. При концентрації носіїв заряду $10^{17}\text{-}10^{18} \text{ см}^{-3}$, ширини інверсного шару $l_{\text{n-inv}} \sim 0,01\text{-}0,2$ мкм, розрахунок товщини шару збіднення проводився по формулі:

$$d_p = [-2\epsilon_0 \epsilon_{\text{CdTe}} / e p_0]^{1/2}. \quad (2)$$

Відповідно до розрахунків, товщина шару збіднення гетеропереходу $p^+ \text{-ZnTe/p-CdTe}$, який поширюється вглибину телуриду кадмію, становить 2,4 мкм, а для гетеропереходу $p\text{-CdTe/n}^+ \text{-ITO}$ - 3,4 мкм. Тож за товщини шару CdTe 5 мкм він практично весь буде зайнятий шаром збіднення, за виключенням 0,5 мкм на границі ZnTe/CdTe, де буде шар збагачення. Якщо прикласти зворотну напругу $U=10$ В, то можна отримати шар збіднення $d_p \sim 11$ мкм, а $U=5$ В - $d_p \sim 8$ мкм. При товщині шару CdTe 5 мкм і прикладанні зворотної напруги 5 В у базовому шарі буде існувати електричне поле з

напруженістю $E \sim 10^4$ В/см. Дрейфова швидкість електронів в електричному полі $v_d = \mu_n E$. Якщо прийняти рухливості електронів в плівці CdTe в 5 разів меншою, ніж в монокристалі, то для швидкості неосновних носіїв заряду в такому електричному полі маємо значення $2.4 \cdot 10^6$ см/с. За таких умов, час прольоту електрону (t_{np}), через шар CdTe вибраної товщини 5 мкм, складе $t_{np} \sim 2 \cdot 10^{-10}$ с. Отриманий час відповідає граничній частоті 5 ГГц, що в два рази краще за існуючі на ринку високочастотні р-і-п фотодіоди на основі монокристалів кремнію з мінімальною активною площею 10^4 - 10^5 мкм². При довжині шару телуриду кадмію $d=5$ мкм, товщині базового шару $b=3$ мкм та ширині w такого шару 0,5 см ємність приладової структури $C < 0,5$ пФ, що відповідає промисловим зразкам з подібною площею фоточутливої поверхні:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S/d; S = bw. (3)$$

Таким чином, проведені розрахунки дозволяють запропонувати геометричні розміри базового шару телуриду кадмію для високочастотного гнучкого n^+ -ITO/i-CdTe/p⁺-ZnTe фотодіода: довжина шару 5 мкм, товщина 3 мкм, ширина 0,5 см. Таким чином, площа фотоелектричної поверхні телуриду кадмію складає 25000 мкм². Загальна товщина приладової структури з урахуванням з підкладки - 10 мкм.

В запропонованій конструкції n^+ -ITO/i-CdTe/p⁺-ZnTe фотодіода як базовий шар використовується плівка телуриду кадмію товщиною 3 мкм, що на два порядки менше товщини кристалів кремнію. Гетеросистема виготовлена в плівковому вигляді, що за рахунок використання вакуумних технологій забезпечує знижену енергоємність процесу виготовлення фотодіода. За рахунок використання гнучкої підкладки спрощується її інтеграція до мікросхеми та зменшується негативний температурний вплив на сформовані раніше елементи інтегральної мікросхеми. Розраховані вище геометричні розміри базового шару теоретично дозволяють досягнути технічних характеристик, характерних для промислових зразків високочастотних р-і-п фотодіодів на основі монокристалів кремнію з аналогічною активною площею при менших напругах зміщення.

Приклад здійснення корисної моделі.

На першому етапі формування фотодіода на поверхню поліімідної плівки методом нереактивного високочастотного магнетронного розпилення при температурі осадження 200 °С наносять плівку сульфиду кадмію товщиною 0,1 мкм. Ця плівка використовується як прошарок, який за рахунок близького до телуриду кадмію періоду кристалічної ґратки та більш наближеного порівняно з поліімідом коефіцієнтом температурного розширення знижує рівень макро- та мінідеформацій в процесі зростання плівки телуриду кадмію та, відповідно, знижує концентрацію структурних дефектів. Потім у квазізамкненому об'ємі в умовах, наближених до термодинамічно рівноважних, при температурі 330 °С осаджують плівку телуриду кадмію товщиною 3 мкм.

На другому етапі для збільшення розмірів зерен та покращення фоточутливості базового шару телуриду кадмію за рахунок збільшення часу життя генерованих під дією світла нерівноважних носіїв заряду проводиться "хлоридна" обробка. Для цього на поверхню телуриду кадмію без нагрівання підкладки наносять плівку хлориду кадмію товщиною 0,3 мкм а потім відпалюють на повітрі при температурі 420 °С протягом 25 хвилин. Для видалення продуктів реакції хлориду та телуриду кадмію проводять травлення в розчині броду в метанолі.

Для захисту поверхні телуриду кадмію і зниження концентрації електрично активних дефектів на гетерограниці CdTe/ITO методом нереактивного магнетронного розпилення наносять прошарок нелегованого високоомного оксиду цинку. Потім методом магнетронного розпилення наносять шар ITO n^+ -типу електропровідності товщиною 3 мкм при температурі осадження 300 °С та ZnTe:N p^+ -типу електропровідності при температурі осадження 300 °С. Як електроди використовувалися плівки міді, отримані методом термовакуумного випаровування.

Можливість здійснення корисної моделі підтверджена виготовленням та дослідженням серії зразків гнучкого планарного високочастотного фотодіода з планарною плівковою структурою n^+ -ITO/i-CdTe/p⁺-ZnTe, конструкцію якого наведено на фіг. 1. Для визначення властивостей виготовлених зразків досліджували спектральну залежність фоточутливості, залежність електричної ємності від зворотної напруги та залежність темного струму від зворотної напруги. Такі характеристики є типовими для оцінювання високочастотних фотодіодів і дають змогу підтвердити працездатність заявленої конструкції та її придатність для використання як високочастотного фотоприймального елемента.

Вимірювання спектральної залежності фотоструму нами здійснювалося за допомогою спеціальної оптико-електричної системи, опис якої наведений в [9] при модуляції світлового потоку з частотою 230 Гц. Типова спектральна залежність фоточутливості наведена на фіг. 2. Для порівняння наведено аналогічну характеристику для промислового зразка високочастотного діода з аналогічною активною площею на основі кремнію [5].

Вимірювання темнових вольт-фарадних характеристик здійснювалося за допомогою високочастотного LCR-метра HP4275A, виробництва фірми Hewlett Packard шляхом одночасної подачі на зразок постійної напруги в діапазоні від -5 В до +2 В і синусоїдального сигналу з частотою 1 МГц і

амплітудою 10 мВ. Типова експериментальна залежність електричної ємності фотодіода n+ ITO/p CdTe/p+-ZnTe від зворотної напруги при частоті 1 МГц наведена на фіг. 3. Для порівняння наведено аналогічну характеристику для промислового зразка високочастотного діода з аналогічною активною площею на основі кремнію [5].

Для вимірювання темнових ВАХ використовувався автоматичний аналізатор 4145A Semiconductor Analyzer, виробництва фірми Hewlett Packard. Типову експериментальну залежність темнового струму фотодіода n+ITO/p-CdTe/p+-ZnTe від зворотної напруги наведено на фіг. 4. Для порівняння наведено аналогічну характеристику для промислового зразка високочастотного діода з аналогічною активною площею на основі кремнію [5].

Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить, що розроблені зразки планарного плівкового гнучкого високочастотного діода на основі приладової структури ITO/p-CdTe/p+-ZnTe з фоточутливою поверхнею 25000 мкм² мають значення: максимальної фоточутливості - 0,39 А/Вт, електричної ємності - 0,8 пФ, темнового струму при зворотній напрузі 1 В - 1 пА.

Таким чином, наведені конструктивні ознаки, розрахункові дані та результати експериментального дослідження виготовлених зразків підтверджують досягнення технічного результату, який полягає у забезпеченні гнучкості фотодіода, можливості його інтеграції у планарні приладові структури та використанні як високочастотного фотоприймального елемента при зменшеній товщині фоточутливої структури.

Перелік наведених креслень:

фіг. 1 - Конструкція гнучкого планарного високочастотного фотодіода на основі телуриду кадмію;

фіг. 2 - Типова експериментальна спектральна залежність фоточутливості фотодіода n+ITO/i-CdTe/p+-ZnTe порівняно із промисловим зразком високочастотного діода з аналогічною активною площею [5] на основі кремнію;

фіг. 3 - Типова експериментальна залежність електричної ємності фотодіода n+ITO/p CdTe/p+-ZnTe від зворотної напруги при частоті 1 МГц порівняно із промисловим зразком високочастотного діода з аналогічною активною площею [5] на основі кремнію;

фіг. 4 - Типова експериментальна залежність темнового фотоструму фотодіода n+ITO/p-CdTe/p+-ZnTe від зворотної напруги порівняно із промисловим зразком високочастотного діода з аналогічною активною площею [5] на основі кремнію.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ:

1. Traversa M., Prete P., Farella I. Et al. / A MOVPE technology for fabrication of CdTe-based homoepitaxial p-i-n diode structures as nuclear radiation detectors. In Proceedings of IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces 2007, 162-166 26-28.

2. Chusnutdinowa S., Makhniyb V.P., Wojtowicza T. and G. Karczewskia / Electrical Properties of p-ZnTe/n-CdTe Photodiodes // ACTA PHYSICA POLONICA, Vol. 122 (2012), No. 6, P. 1077-1079.

3. Salavei A., Artegiani E., Piccinelli F., et. al. Flexible CdTe solar cells on polyimide and flexible glass substrates. / In Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Berlin/Heidelberg, Germany, 14-18 September 2015.

4. Хрипунов Г.С., Рос Д.Б., Харченко М.М., Кравець А.В., ТОВАЖНЯНЬСЬКА О.Л., СТАНКЕВИЧ А.І // Спосіб формування базових шарів телуриду кадмію для гнучких сонячних елементів та пристроїв для його реалізації Патент України на винахід № 94649, зареєстровано 25.05.2011

5. Si PIN photodiode S9055 series / Вебресурс, режим доступу: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s9055_series_kpin1065e.pdf

6. Nehate S.D., Prakash A., Doss Mani P., and Sundaram K.B. / Work Function Extraction of Indium Tin Oxide Films from MOSFET Devices // ECS Journal of Solid State Science and Technology, 7 (3) P87-P90 (2018) P.87.

7. Sharma B.L., Purohit R.K. / Semiconductors heterojunction. // Pergamon Press, 1974.

8. Фізичні величини. Довідник. Під ред. Григор'єва І.С., Мейліхова Є.З. - М.: Енергоатоміздат, 1991.

9. G.S. Khrypunov, A.I. Dobrozhan, M.V. Kirichenko, R.V. Zaitsev, M.S. Khrypunov, A.V. Meriuts. Application of Bifacial Solar Cells on Cadmium Telluride Base to Determine the Wave-length of Pulsed Laser Diode Radiation // Journal of Nano-and Electronic Physics, 2024, Vol. 16, P.06013-1-06013-6.

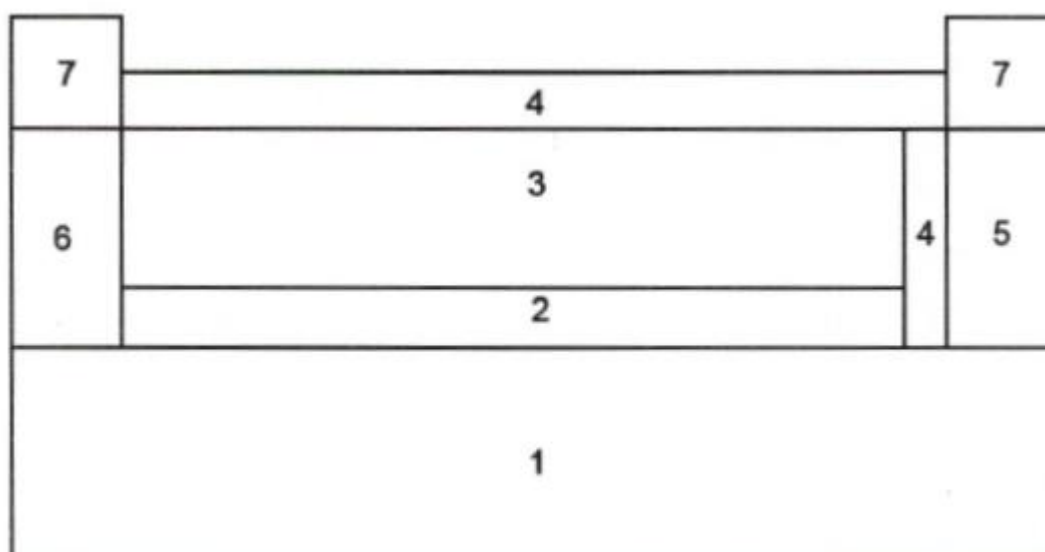


Fig. 1

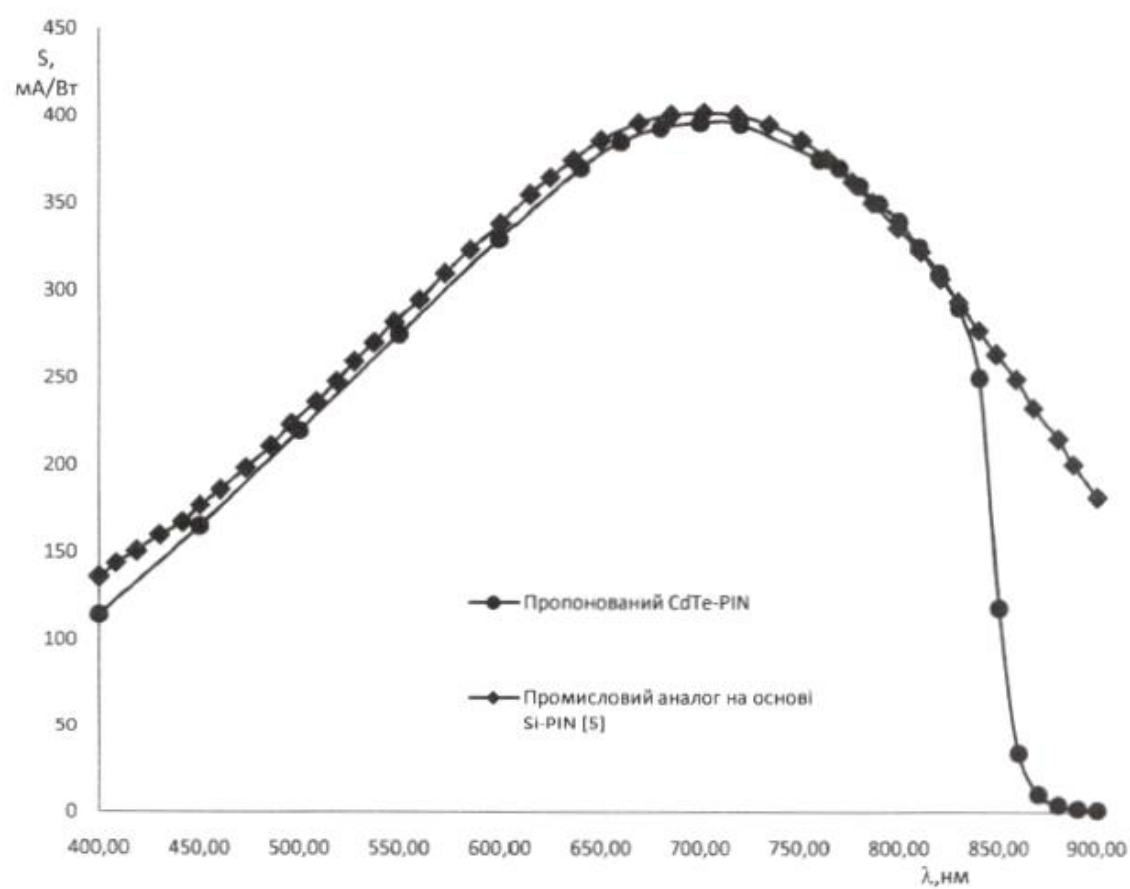


Fig. 2

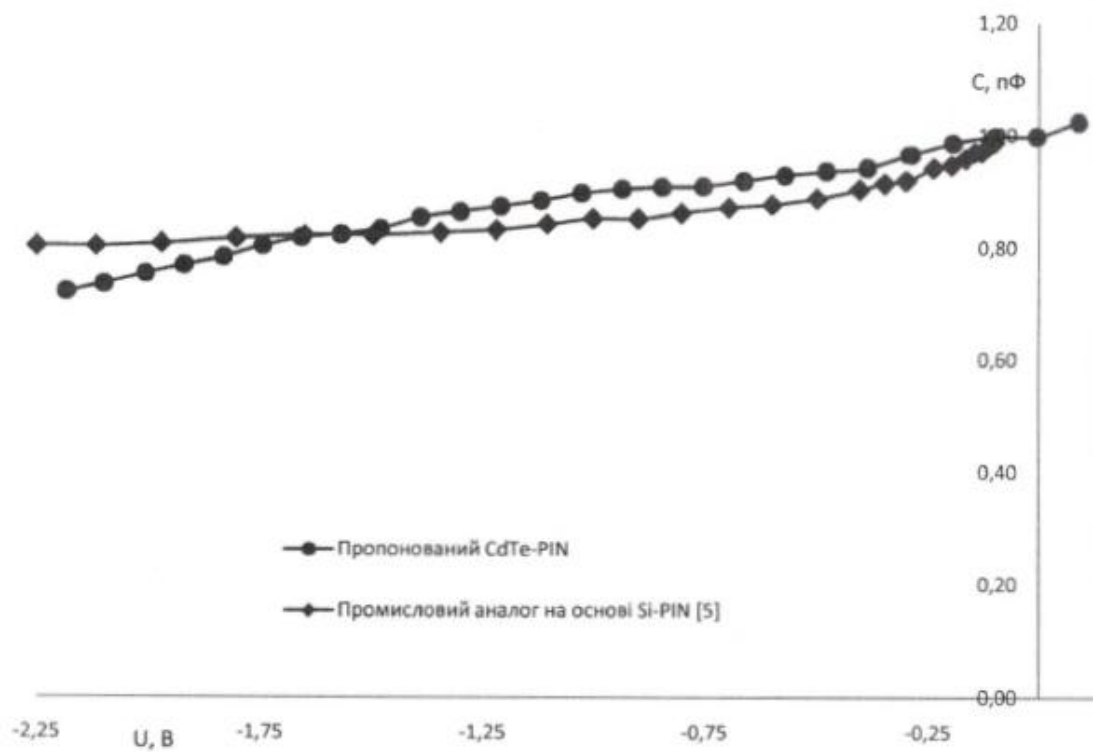


Fig. 3

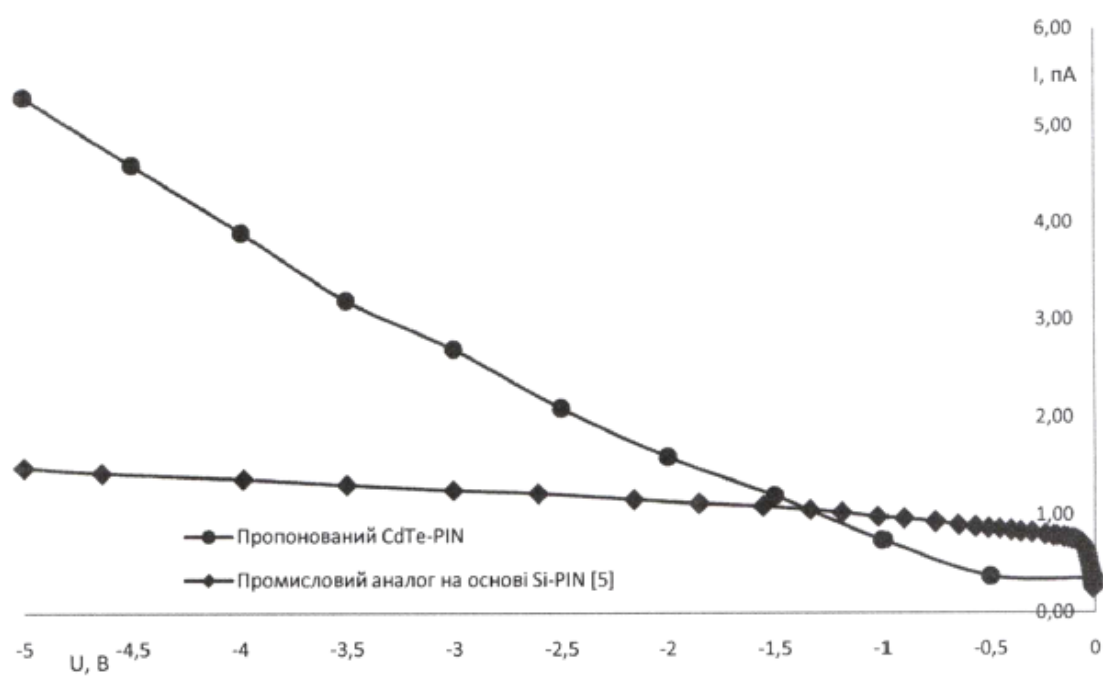


Fig. 4