

УДК 621. 315. 592

О. В. Новосад – завідувач лабораторіями кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

В. В. Божко – кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

О. Р. Герасимик – аспірантка кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки

Електричні і фотоелектричні властивості структур $\text{In/Cu}_{0,92}\text{Zn}_{0,08}\text{InS}_2$

Роботу виконано на кафедрі фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій ВНУ ім. Лесі Українки

Методом термічного вакуумного напилення індію на поверхню тонких сколів монокристалів твердих розчинів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ отримано фоточутливі структури $\text{In/n-Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ ($x=0\text{-}0,16$). Досліджено стаціонарні та світлові вольт-амперні характеристики одержаних структур. Обговорено механізми струмоперенесення і процеси фоточутливості.

Ключові слова: тверді розчини, фоточутливі структури, вольт-амперна характеристика, коефіцієнт випрямлення, фотонапруга.

Новосад А. В., Божко В. В., Герасимик О. Р. Электрические и фотоэлектрические свойства структур $\text{In/Cu}_{0,92}\text{Zn}_{0,08}\text{InS}_2$. Методом термического вакуумного напиления индия на поверхность тонких сколов монокристаллов твердых растворов $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ получены фоточувствительные структуры $\text{In/n-Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ ($x = 0\text{-}0,16$). Исследованы стационарные и световые вольт-амперные характеристики полученных структур. Обсуждаются механизмы токопереноса и процессы фоточувствительности.

Ключевые слова: твердые растворы, фоточувствительные структуры, вольт-амперная характеристика, коэффициент выпрямления, фотонапряжение.

Novosad O. V., Bozhko V. V., Gerasymyk O. R. Electrical and Photoelectrical Properties of the Structures $\text{In/Cu}_{0,92}\text{Zn}_{0,08}\text{InS}_2$. Photosensitive structures of the $\text{In/n-Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ ($x=0\text{-}0,16$) have been prepared by the thermal vacuum deposition of indium on the surface of single crystals of solid solutions $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ thin chips. The stationary and light current-voltage characteristics of these structures are studied. The current mechanisms and the photosensitivity processes of the thin structures are being discussed.

Key words: solid solutions, photosensitive structures, current-voltage characteristics, rectification factor, photovoltage.

Постановка наукової проблеми та її значення. Проблема фотовольтаїчного перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію має комплексний характер, але це насамперед – вибір та отримання напівпровідникового матеріалу, створення таких структур, як метал-напівпровідник, напівпровідник-напівпровідник (p-n-переходи, гетеропереходи) та ін.

Одним із перспективних матеріалів для створення високоефективних фотоелектроперетворювачів сонячного випромінювання є сполука CuInS_2 та тверді розчини на її основі, де другим компонентом виступає сполука із спорідненою структурою. CuInS_2 кристалізується у структурі халькопіриту, ширина забороненої зони ($E_g \approx 1,5$ eV) та високе значення коефіцієнта поглинання світла ($\alpha \approx 10^5$ см⁻¹) є оптимальними для перетворення сонячної енергії в електричну. Зміна компонентного складу твердого розчину веде до плавної зміни оптичних і електричних властивостей напівпровідникового матеріалу, і відповідно, параметрів переходу метал-напівпровідник.

Мета статті – створити та експериментально дослідити електричні та фотоелектричні властивості діодних структур $\text{In/n-Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ ($x = 0\text{-}0,16$) на основі маловивчених твердих розчинів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$.

Завдання – на основі експериментальних результатів визначити основні електричні та фотоелектричні параметри досліджуваних бар'єрних структур $\text{In/Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$. Проаналізувати

процеси струмоперенесення та фоточутливості. Узагальнити про перспективність використання отриманих випрямних структур в оптоелектроніці та твердотільній електроніці.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження.

На напівпровідникових кристалах твердих розчинів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 4, 8, 12, 16 мол.% ZnIn_2S_4 методом термічного вакуумного напилення індію створено фоточутливі діодні структури $\text{In/n-Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ ($x = 0\text{-}0,16$).

За результатами наших досліджень, найкращими фотоелектричними властивостями володіють структури $\text{In/Cu}_{0,92}\text{Zn}_{0,08}\text{InS}_2$, що частково пояснюємо високою фоточутливістю твердих розчинів $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ із вмістом 8 мол.% ZnIn_2S_4 , порівняно з іншими зразками даної системи [6] при кімнатних температурах.

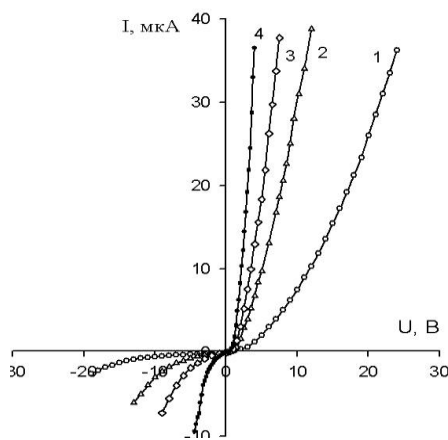
Рис. 1. ВАХ структур $\text{In/n-Cu}_{0,92}\text{Zn}_{0,08}\text{InS}_2$ при $T=300\text{K}$: 1 – стаціонарна, 2, 3, 4 – при потужності освітлення 4 мВт, 8 мВт, та 30 мВт відповідно

Для одержання фоточутливих структур використовувались тонкі сколи у вигляді дзеркальної площини із злитків, отриманих при вирощуванні. Відомо [3], що сполука CuInS_2 розколюється по кристалографічній площині (122), яка вважалась робочою поверхнею з площею контакту $\approx 3 \times 3 \text{ мм}^2$, виготовлених нами систем.

Товщина сколів становила 0,05–0,2 мм. Непрозорі індієві плівки наносились термічним вакуумним напиленням у ВУП-5 при тиску 10^{-7} мм рт. ст. та $T \approx 300 \text{ K}$.

Дослідження виготовлених таким способом структур свідчить, що отримані структури $\text{In/Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InS}_2$ мають випрямні властивості, кращі з яких базуються на кристалах $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ з 8 мол.% ZnIn_2S_4 . На рисунку 1 подано типові вольт-амперні характеристики (ВАХ) однієї з таких структур у стаціонарних умовах (у темноті крива 1) та при різних потужностях освітлення (криві 2, 3, 4).

Освітлення проводилось зі сторони вільної поверхні зразка світлом галогенної лампи. Максимальне значення коефіцієнта випрямлення K (табл. 1), який визначався відношенням прямого струму до зворотного при сталій напрузі



(табл. 1), зростає зі зниженням освітленості структур, що обумовлено зростанням опору напівпровідника. Припускаємо, що отримані значення K обмежені у величині недостатньою досконалістю отриманих поверхнево-бар'єрних структур. При прямому зміщенні, яке відповідало

додатньому значенню напруги на зразку (рис. 1) вітки ВАХ при напругах, більших за деяку напругу U_0 , описано лінійними рівняннями:

$$I = \frac{U - U_0}{R_0}. \quad (1)$$

Таблиця 1

Фотоелектричні параметри структур $\text{In/n-Cu}_{0,92}\text{Zn}_{0,08}\text{InS}_2$

№ з/п	P, мВт	R_0 , МОм	U_0 , В	I_0 , мкА	n	K
1	0	0,50	7,5	0,413	80	15 (10В)
2	4	0,24	3,5	0,268	42	13,5 (4В)
3	8	0,13	2,5	0,196	26	10,4 (4В)
4	15	0,10	1,9	0,135	19	10,1 (4В)
5	30	0,065	1,5	0,0571	13	6 (2,5В)

Напруга відсікання U_0 , залишковий опір R_0 і їх залежність від потужності (P) освітлення структур подано у таблиці 1.

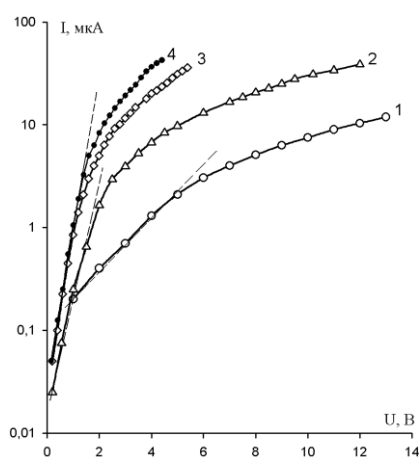


Рис. 2. Прямі вітки ВАХ структур $\text{In/n-Cu}_{0,92}\text{Zn}_{0,08}\text{InS}_2$ при $T = 300$ у напівлогарифмічному масштабі 1 – темнова, 2, 3, 4 – при потужності освітлення 4 мВт, 8 мВт, та 30 мВт

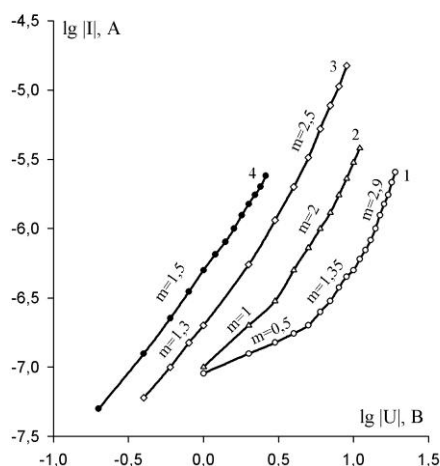


Рис. 3. Обернені вітки ВАХ структур $\text{In/n-Cu}_{0,92}\text{Zn}_{0,08}\text{InS}_2$ при $T = 300$ у подвійному логарифмічному масштабі 1 – темнова, 2, 3, 4 – при потужності освітлення 4 мВт, 8 мВт, та 30 мВт

На рисунку 2 представлено вітки ВАХ при прямому зміщенні у напівлогарифмічному масштабі. Загалом зазначаємо, що початкова частина ВАХ добре описується характерним для фотодіода експоненціальним законом [2; 3]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

де значення струмів насичення I_0 та коефіцієнта неідеальності n подано в таблиці 1. Зменшення коефіцієнта неідеальності від $n \approx 80$, за відсутності освітлення, до $n \approx 13$, при максимальному освітленні, відображає вплив високого опору структур на прямі вітки ВАХ, що не дозволяє зробити висновки про механізм проходження струму в отриманих структурах. Із рисунка 2 простежуємо найбільш чітку експоненційну залежність прямого струму, яку виявляємо при максимальному освітленні.

На рисунку 3 зображено зворотні вітки ВАХ запропонованих структур у подвійному логарифмічному масштабі. Особливістю досліджуваної структури є присутність звичайних для неорганічних напівпровідників степеневих [4] залежностей зворотного струму від напруги:

$$I \sim U^m. \quad (3)$$

На рисунку 3 числове значення m вказане біля кривих. Показник степеня $m \approx 0,5$ (рис. 3, крива 1) темної ВАХ при $0 < U < -5$ В дозволяє припустити, що струм обумовлений тунелюванням носіїв заряду або обмеженням просторового заряду в режимі насичення швидкості носіїв заряду [4]. При $5 < U < -10$ відбувається збільшення показника m до значення 1,35–1,6, що добре описано законом Чайдла-Лангмюра [4], який характеризує струми, обмежені просторовим зарядом у балістичному режимі. При більших зворотніх зміщеннях степеневий показник зростає до $m \approx 2,9$, відповідно залежність струму від напруги зображено із врахуванням неперервного (експоненційного) розподілу пасток по енергіях [4]. Порівнюючи криві 1, 2, 3, 4 (рис. 3), зробимо висновки про вплив світла на конкурування різних механізмів проходження електричного струму.

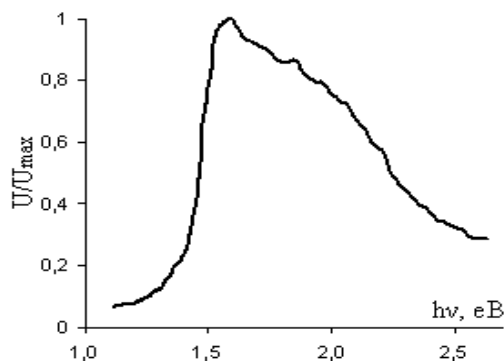


Рис. 4. Спектральний розподіл фотонапруги структур $In/n-Cu_{0,92}Zn_{0,08}InS_2$ при $T = 300$ К.

При освітленні отриманих структур проявляється фотовольтаїчний ефект, знак якого узгоджується з напрямком випрямлення. Вказане значення вольтової чутливості є максимальним для структур $In/CuInS_2-ZnIn_2S_4$ з 8 мол.% $ZnIn_2S_4$ при освітленні зі сторони вільної поверхні зразка. Величина вольтової чутливості при $T = 300$ К становила ~ 20 В/Вт.

На рисунку 4 подано спектральний розподіл фотонапруги досліджуваної нами структури. Особливістю даного спектрального розподілу є висока фоточутливість у широкому інтервалі енергій, повна ширина спектрів $U/U_{max}(h\nu)$ на половині висоти становить 0,8 еВ. Максимум фотонапруги у цьому випадку відповідає енергії квантів світла 1,58 еВ, що є близьким до ширини забороненої зони даного твердого розчину [6; 1] та ширини забороненої зони сполуки $CuInS_2$ [3].

Висновки. Таким чином, створені та досліджені у праці бар'єрні структури $In/n-Cu_{1-x}Zn_xInS_2$ ($x = 0-0,16$) мають випрямні властивості та характеризуються фотовольтаїчним ефектом. Із результатів аналізу визначених нами електричних та фотоелектричних параметрів встановлено, що кращими є структури на основі твердого розчину $CuInS_2-ZnIn_2S_4$ з 8 мол.% $ZnIn_2S_4$.

Зіставляючи стаціонарні та світлові ВАХ, стверджуємо про вплив світла на конкуренції різних механізмів проходження електричного струму через контакт метал-напівпровідник.

Особливістю спектрального розподілу фотонапруги структур $In/n-Cu_{1-x}Zn_xInS_2$ при $x = 0,08$ є висока фоточутливість у широкому інтервалі енергій, що свідчить про перспективність використання твердих розчинів цього компонентного складу як матеріалу для створення фотоелектроперетворювачів з широким спектральним вікном електромагнітного випромінювання в області видимого і ближнього інфрачервоного світла.

Список використаної літератури

1. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов : учеб. пособие / В. И. Гаман. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1989. – 336 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн. Кн. 1. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
3. Иванов В. А. Излучательные и фотоэлектрические свойства монокристаллов $CuInS_2$ / В. А. Иванов, И. А. Викторов, В. Ф. Гременок // Физика и техника полупроводников. – 2002. – № 9. – Т.72. – С. 134–135.
4. Ламперт М. Инжекционные токи в твердых телах / М. Ламперт, П. Марк. – М. : Мир, 1973. – 416 с.

5. Особливості електропровідності, термо-ЕРС та оптичного поглинання твердих розчинів $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$ та $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ / В. В. Божко та ін. // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. – 2008. – № 8 : Фіз. науки. – С. 3–10.
6. Фотоелектричні властивості та магнітоопір твердих розчинів $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$ та $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ / Г. Є. Давидюк та ін. // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. – 2009. – № 18 : Фіз. науки. – С. 19–25.

Статтю подано до редколегії
23.06.2011 р.