

УДК: 621.31:535.215

М.В. Кіріченко, Р.В. Зайцев, Г.С. Хрипунов, М.М. Харченко, А.М. Дроздов, А.А. Дроздова
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ВИГОТОВЛЕННЯ БАЗОВИХ ШАРІВ ГНУЧКИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТОДОМ ОСАДЖЕННЯ У КВАЗІЗАМКНеноМУ ОБ'ЄМІ ПЛІВОК СУЛЬФІДУ ТА ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ

Експериментальними дослідженнями критичних температур конденсації при осадженні плівок сульфідів та телуриду кадмію в квазізамкненому об'ємі визначені режими, в яких осадження відбувається в умовах близьких до термодинамічно рівноважних, а температура підкладки нижче температури термодеструкції поліімідних плівок фірми Upilex. Для технічної реалізації цих умов розроблена адаптована до існуючого вакуумного обладнання підприємств електронної промисловості технологічна оснастка, що дозволяє в єдиному технологічному циклі послідовно осаджувати шари сульфідів і телуриду кадмію в умовах близьких до термодинамічно рівноважних. При температурі осадження 434 °С на поліімідних підкладках з плівковим шаром ІТО поверх якого нанесений нанорозмірний прошарок ZnO були отримані шари CdS товщиною 0,3 мкм стабільної гексагональної модифікації. На поверхні шарів CdS при температурах нижче 440 °С були сформовані шари CdTe товщиною 4 мкм стабільної кубічної модифікації. Досягнуті параметри кристалічної структури плівок сульфідів та телуриду кадмію, виготовлених методом квазізамкненого об'єму дозволяють використовувати такі напівпровідникові шари в якості базових при розробці високоефективних гнучких сонячних елементів.

Ключові слова: сульфід і телурид кадмію, квазізамкнений об'єм, температура підкладки, термодинамічна рівновага, гнучкі фотоелектричні перетворювачі

М.В. Кириченко, Р.В. Зайцев, Г.С. Хрипунов, Н.М. Харченко, А.Н. Дроздов, А.А. Дроздова ИЗГОТОВЛЕНИЕ БАЗОВЫХ СЛОЕВ ГИБКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ В КВАЗИЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ ПЛЕНОК СУЛЬФИДА И ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ

Експериментальними дослідженнями критичних температур конденсації при осадженні плівок сульфідів та телуриду кадмію в квазізамкненому об'ємі визначені режими, в яких осадження відбувається в умовах близьких до термодинамічно рівноважних, а температура підкладки нижче температури термодеструкції поліімідних плівок фірми Upilex. Для технічної реалізації цих умов розроблена адаптована до існуючого вакуумного обладнання підприємств електронної промисловості технологічна оснастка, що дозволяє в єдиному технологічному циклі послідовно осаджувати шари сульфідів та телуриду кадмію в умовах близьких до термодинамічно рівноважних. При температурі осадження 434 °С на поліімідних підкладках з плівковим шаром ІТО поверх якого нанесена нанорозмірна прошарок ZnO були отримані шари CdS товщиною 0,3 мкм стабільної гексагональної модифікації. На поверхні шарів CdS при температурах нижче 440 °С були сформовані шари CdTe товщиною 4 мкм стабільної кубічної модифікації. Досягнуті параметри кристалічної структури плівок сульфідів та телуриду кадмію, виготовлених методом квазізамкненого об'єму дозволяють використовувати такі напівпровідникові шари в якості базових при розробці високоефективних гнучких сонячних елементів.

Ключевые слова: сульфид и теллурид кадмия, квазізамкнутый об'єм, температура підкладки, термодинамічне рівновага, гнучкі фотоелектричні перетворювачі

M.V. Kirichenko, R.V. Zaitsev, G.S. Khrypunov, M.M. Kharchenko, A.M. Drozdov, A.A. Drozdova MANUFACTURING OF CADMIUM SULFIDE AND CADMIUM TELLURIDE FILMS BY THE DEPOSITION IN A CLOSE-SPACED SUBLIMATION FOR FLEXIBLE PHOTOVOLTAIC CELLS BASE LAYERS

Experimental studies of the critical condensation temperatures at cadmium sulfide and cadmium telluride films deposition in a close-spaced sublimation allowed to determine the modes, wherein deposition is carried out in conditions that are close to thermodynamic equilibrium and at substrate temperatures below the thermal destruction temperature of polyimide films Upilex company.

For the technical implementation of these conditions has been developed the adapted to the vacuum equipment of domestic electronics industry technological rigging, which allows in a single technological cycle by method to deposit successively the cadmium sulfide and cadmium telluride layers in conditions that are close to thermodynamic equilibrium.

At deposition temperature 434°C on the polyimide films with ITO layer on the surface of which is nanosized ZnO interlayer CdS layers with thickness of 0.3 microns and stable hexagonal modification were obtained.

On the surface of CdS layers at temperatures below 440° C CdTe layers with thickness of 4 microns and stable cubic modification were formed.

Key words: cadmium sulfide and cadmium telluride films, close-spaced sublimation, the substrate temperature, thermodynamic equilibrium, flexible photovoltaic cells.

Постановка проблеми. Існуючі методи формування базових шарів сульфідів та телуриду кадмію для тонкоплівкових сонячних елементів, зокрема метод парового транспорту, дозволяють створювати високоякісні структури лише при температурі осадження понад 500 °С. Це збільшує

ресурсоємність та економічну ефективність таких методів та не дозволяє використовувати їх в при розробці гнучких тонкоплівкових сонячних елементів на основі телуриду кадмію через обмеження термостабільності існуючих полімерних плівок на рівні 450 °С.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час для плівкових сонячних елементів (СЕ) на основі плівок сульфідів та телуриду кадмію тильної конфігурації досягнута ефективність 22,1% [1]. Такі приладові структури виготовлені фірмою "First solar" на скляних підкладках методом парового транспорту (VTD метод) при використанні температур осадження понад 500 °С.

Досягнення високої ефективності СЕ обумовлено реалізацією режимів осадження близьких до термодинамічно рівноважних. З урахуванням досягнутої ефективності та низької енергоємності плівкові СЕ на основі CdS/CdTe являють альтернативу СЕ на основі моно-Si і GaAs [2,3]. Заміна скляних підкладок на поліімідні плівки дозволяє створювати гнучкі СЕ з рекордними значеннями електричної потужності на одиницю ваги. Ці якості гнучких СЕ відкривають широкі перспективи не тільки для їх космічного, а й для наземного застосування. Зокрема, вони можуть використовуватися в якості джерел електроживлення безпілотних літальних апаратів, автономних джерел живлення радіоелектронної апаратури, джерел живлення для систем кондиціонування автомобілів і катерів, фотоелектричних батарей, які монтуються на дахах будинків зі складними профілями поверхні та ін.. В даний час фірми Apical, Kapton, Kaptrex, Meldin, Vespel, Plavis і UPILEX виробляють термостабільні прозорі плівки на основі полііміду. Найбільш високу термостабільність до 450 °С мають поліімідні плівки UPILEX-S [4]. Середній коефіцієнт пропускання у видимій області сонячного спектру, для цих плівок досягає 80%, що робить їх найбільш перспективними для створення високоефективних гнучких СЕ тильної конфігурації. Однак обмеження термостабільності плівок на рівні 450 °С не дозволяють використовувати їх в якості підкладок для осадження телуриду кадмію методом парового транспорту. Вирішенням може бути використання вакуумного методу конденсації телуриду кадмію у квазізамкненому об'ємі (КЗО), котрий, як і VTD, дозволяє проводити осадження в умовах близьких до термодинамічної рівноваги [5].

Постановка завдання. Виходячи з цього, основним завданням даної роботи буде визначення умов осадження плівок сульфідів та телуриду кадмію у квазізамкненому об'ємі на поліімідні підкладки з метою використання низькотемпературного методу КЗО для створення базових шарів високоефективних гнучких СЕ.

Викладення основного матеріалу.

Розробка технологічної оснастки для осадження плівок сульфідів та телуриду кадмію у квазізамкненому об'ємі. Для осадження плівок сульфідів та телуриду кадмію до складу оснастки повинні входити дві графітові камери, кожна камера складається із зони конденсації, в якій розташована підкладка, і зони випарника. Оснастка також включає в себе багатоканальну електронну систему, призначену для контролю і підтримки необхідної температури конденсації, з вимірюванням температури безпосередньо на фронтальній поверхні підкладки; систему механічного переміщення підкладки від однієї камери квазізамкненого об'єму до іншої для послідовного нанесення шарів CdS і CdTe.

Для реалізації умов близьких до термодинамічної рівноваги масова витрата пари сульфідів і телуриду кадмію з парової фази повинна повністю компенсуватися масовою витратою матеріалів з джерела в пару елементів за рахунок перевищення площі поверхні випаровування в джерелі по відношенню до площі підкладки. При цьому ступінь прилягання підкладки до джерела повинна мінімізувати витоки пари в зовнішній об'єм, які не повинні перевищувати 5%.

Виходячи із зазначених вимог була розроблена конструкція камер КЗО яка складається з таких конструктивних елементів: основа, горловина, зона підготовки, випарник, кільце, екран, кришка екрану, стійка і нагрівачі. Схематичний вигляд камери КЗО представлений на рисунку 1.

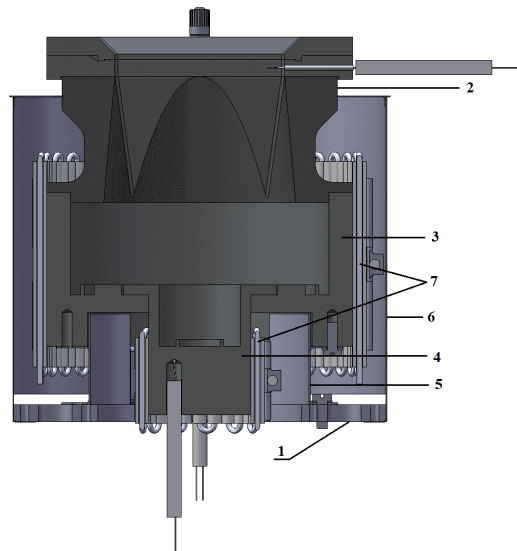


Рис. 1. Схематичний вигляд розробленої камери КЗО, цифрами позначено: 1 - основа, 2 - горловина, 3 - зона підготовки, 4 - випарник, 5 - кільце, 6 - екран, 7 - нагрівачі

Для забезпечення можливості використання стандартних промислових вакуумних установок при конструюванні технологічної оснастки було передбачено, що дві графітові камери КЗО встановлюються на штатній плиті вакуумного поста УВН на першій і третій позиції. Друга позиція використовується для проведення операції попереднього нагріву підкладки. Тримач підкладки з нагрівачем об'єднаний в єдиний вузол і розміщений на каруселі. Вузол обертання каруселі був доопрацьований для забезпечення переміщення тримача з нагрівачем у вертикальному напрямку. Для цього карусель була приєднана до ходової гайки, яка розташована на ходовому гвинті. Ходовий гвинт встановлений в штатний вузол підшипників вузла обертання каруселі УВН. Обертання ходовому гвинту передається від штатного механізму приводу каруселі, розташованого у верхній частині ковпака УВН. Для запобігання обертання каруселі в цьому випадку використаний фіксатор, керований від електромагніту приводу заслінки. Таким чином, обертання валу приводу каруселі за/проти годинникової стрілки призводить до руху ходової гайки ходовим валом, а отже і до переміщення вниз/вгору каруселі. Обертання каруселі (переміщення зразка між позиціями) можливо при розблокованому фіксаторі в крайньому верхньому положенні каруселі, тоді ходова гайка стає на упор до нижнього торця гайки обертання. Схематичний вигляд каруселі, що забезпечує виконання зазначених вимог, представлений на рисунку 2.

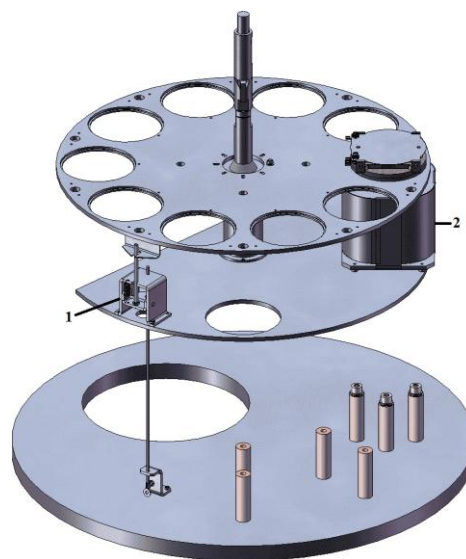


Рис. 2. Схематичний вигляд каруселі зі встановленою камерою КЗО (2) і стопором (1)

Випарні відсіки виготовлених з графіту двох ідентичних камер квазізамкненого об'єму (рис. 3, а), для осадження базових шарів сульфідів і телуриду кадмію в єдиному технологічному циклі,

попередньо були заповнені порошками сульфїду (рис. 3, б) і телуриду кадмію. Для розміщення поліїмїдної плівки в камері КЗО була виготовлена графітова підкладка з металевим тримачем, яка зверху накривалася стрічковим нагрівачем (рис. 3, в).



Рис. 3. Технологічна оснастка для нанесення шарів сульфїду і телуриду кадмію в квазізамкненому об'ємі

Експериментальне визначення критичної температури осадження плівок телуриду та сульфїду кадмію у квазізамкненому об'ємі. Важливою характеристикою процесу вирощування плівок у КЗО є початкова температура конденсації $T_{кр}$ - температура підкладки, при якій досягається критичне пересичення пари і стає можливим зародження на чужорідній підкладці частинок конденсату. Різниця між обраною температурою підкладки $T_{п}$ та $T_{кр}$ є одним з критеріїв відхилення умов початкової стадії росту конденсату від рівноважних. При цьому особливістю осадження плівок на поліїмїдну підкладку є те, що температура підкладки не повинна перевищувати температуру її термостабільності, яка становить $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому в роботі було проведено експериментальне визначення $T_{кр}$ при конденсації пари телуриду кадмію на скляні підкладки в діапазоні температур $T_{п} = 425 - 560\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому була застосована наступна методика. У виготовлену графітову камеру встановлювалася підкладка, яка щільно перекривала весь переріз камери. Телурід кадмію марки (ЧТУ 6-09-01-429-77) у вигляді дрібнодисперсної шихти містився на дні камери, покриваючи всю його площу. Для контролю температури підкладки хромель-алюмелева термопара діаметром $0,15\text{ мм}$ встановлювалася на фронтальній стороні підкладки на відстані $10 - 11\text{ мм}$ від зовнішнього краю зони конденсації. Нагрівання випарника і підкладки здійснювалося двома незалежними нагрівачами під керуванням автоматичної системи. Для нагріву підкладки був застосований радіаційний нагрівач, конструкція якого забезпечувала створення на підкладці радіального градієнта температури від центру до краю.

Потужності окремих нагрівачів камери обиралися таким чином, щоб швидкість нагрівання підкладки перевищувала швидкості нагрівання інших зон, тобто реалізовувалося умова $T_{п} > T_{кр}$ для

всієї поверхні підкладки. Після досягнення цього значення T_n температура підкладки знижувалася до деякого значення, тобто реалізовувалась умова $T_n < T_{кр}$. Такий температурний режим витримувався протягом 5-10 хв. після чого вимикався нагрівач випарника. Нагрівач підкладки вимикався тільки тоді, коли температура випарника знижувалася до значення, що на $30\text{ }^\circ\text{C}$ було нижче температури підкладки. Такий трьох стадійний режим дозволяв уникнути конденсації пари на підкладці в нестационарних режимах розігріву. В результаті на підкладці формувалася конденсат у вигляді кільця, зовнішній діаметр якого обмежений стінкою зони конденсації камери. Внутрішня межа кільця відповідає області підкладки, температура якої дорівнює $T_{кр}$. У серії дослідів при фіксованому значенні T_n температурний режим на підкладці підбирався таким чином, щоб внутрішня межа конденсату тільки досягала місця установки термопари. В цьому випадку дані термопари відповідали значенням $T_{кр}$ при заданій температурі випаровування. При цьому контролювалась відсутність конденсату на стінках камери поблизу підкладки.

Результати експерименту наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Експериментальні результати з визначення початкової критичної температури конденсації

№ серії	$T_n, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{кр}, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_n - T_{кр}, \text{ }^\circ\text{C}$
1	541	443	98
2	503	402	101
3	461	357	103
4	455	351	104
5	425	319	106

Аналіз даних показує, що при зменшенні T_n від $541\text{ }^\circ\text{C}$ до $425\text{ }^\circ\text{C}$ спостерігається зменшення $T_{кр}$ від $443\text{ }^\circ\text{C}$ до $319\text{ }^\circ\text{C}$ при незначному збільшенні різниці ($T_n - T_{кр}$) від $98\text{ }^\circ\text{C}$ до $106\text{ }^\circ\text{C}$.

Аналогічний підхід було застосовано і при визначенні критичних температур осадження плівок сульфідів кадмію. Було встановлено, що при температурах випарника нижче $548\text{ }^\circ\text{C}$ формування конденсату у вигляді кільця не спостерігається. З нашої точки зору це обумовлено меншим тиском насиченої пари сульфідів кадмію в порівнянні з телуридом кадмію при фіксованій температурі випарника [6, 7]. Було встановлено, що при температурі випарника $548\text{ }^\circ\text{C}$ критична температура осадження сульфідів кадмію становить $440\text{ }^\circ\text{C}$. При підвищенні температури випарника сульфідів кадмію критична температура перевищує температуру стабільності поліїмідів.

При проведенні досліджень було встановлено, що достатня стабільність і відтворюваність властивостей плівок телуриду кадмію була досягнута в умовах, коли температура підкладки підтримувалася на $3-4\text{ }^\circ\text{C}$ менше $T_{кр}$, а для плівок сульфідів кадмію - на $5-6\text{ }^\circ\text{C}$ менше за $T_{кр}$. В цьому випадку товщини плівок одержаних в однакових технологічних умовах відрізнялися не більше ніж на 7% . З нашої точки зору причиною такої розбіжності є некерованість перехідних процесів під час розігріву камери.

Дослідження кристалічної структури плівок сульфідів та телуриду кадмію. Нанесення плівок сульфідів кадмію здійснювалося на гнучкі підкладки, які являли собою поліїмідні плівки на які методом магнетронного розпилення були нанесені шар ІТО з нанорозмірним прошарком ZnO. При після установки тримача з підкладкою на карусель проводилася відкачка робочого об'єму до тиску не більше $2 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Після цього проводився попередній прогрів камер випаровування сульфідів і телуриду кадмію і тримача підкладки для дегазації їх поверхонь, при цьому обидві камери були відкриті, а тримач зразка розташований на позиції попереднього нагріву. Для запобігання термоудару швидкість нагріву елементів не перевищувала $40\text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$. Температура під час дегазації всіх елементів підтримувалася в діапазоні $300-340\text{ }^\circ\text{C}$, тривалість витримки при зазначеній температурі становила не менше 4 хв. Критерієм якості дегазації було відновлення ступеня вакууму в робочому об'ємі установки до рівня не гірше $2 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Після дегазації проводилася «збірка» камери квазізамкненого об'єму для нанесення шару CdS для чого обертанням приводу вузла переміщення каруселі тримач з нагрівачем встановлювався в позицію над камерою і опускався на горловину камери. Потім відбувався нагрів зон камери КЗО і стабілізація температури зони підготовки пари і випарника на рівні $548\text{ }^\circ\text{C}$ а температури підкладки

на рівні - 445 °С. Такий режим нагріву зон камери КЗО запобігає неконтрольованій конденсації пари на підкладці на даній операції. Точність підтримки температур при досягненні заданих значень становила ± 1 °С. Нанесення шару CdS на підкладку тривало протягом 5 хвилин для чого при зазначених температурах зони підготовки пари і випарника температура підкладки знижувалась до 434 °С. Початком процесу нанесення шару сульфїду кадмію вважався момент, коли температура підкладки досягала заданого значення. Після закінчення процесу нанесення шару сульфїду кадмію електроживлення нагрівачів випарника і камери вимикалось і камера охолоджувалась, а температура підкладки збільшувалась до 445 °С і підтримувалась постійною до моменту, коли різниця температур зон камери не перевищить 10 °С. Після чого підкладка і камера охолоджувались до температури 400 °С.

Для визначення рівня якості одержаних шарів сульфїду кадмію були проведені дослідження кристалічної структури плівок сульфїду кадмію, товщина яких становила 0,3 мкм, що відповідає вимогам до товщини шару сульфїду кадмію який застосовується в конструкції високоефективних СЕ на основі телуриду кадмію. Аналіз рентгендифрактограм плівок сульфїду кадмію нанесених на поліїмідні підкладки з шаром ІТО (рис. 4) показав, що вони мають кристалічну структуру стабільної гексагональної кубічної модифікації CdS. Наявність кратних рефлексів (002) і (004) свідчить про те, що плівки мають переважну орієнтацію в напрямку [002].

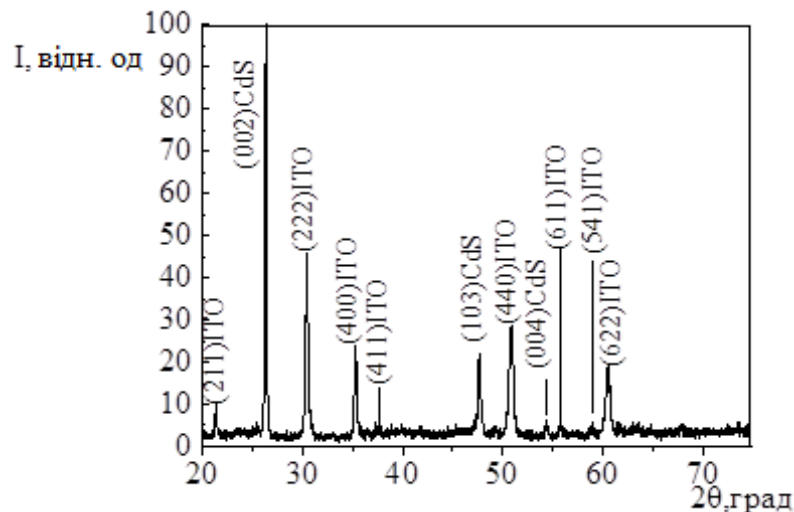


Рис. 4. Рентгендифрактограма плівок сульфїду кадмію сформованих на гнучкій підкладці з плівковим шаром ІТО і нанорозмірним прошарком ZnO.

Після відпрацювання технології нанесення шару CdS, формування плівок телуриду кадмію здійснювалося в єдиному технологічному процесі з нанесенням плівок сульфїду кадмію. Після нанесення шару CdS і охолодження підкладки до 400 °С вона переміщувалась до другої камері КЗО, де проводилася послідовність операцій, аналогічна послідовності при нанесенні шару CdS. Час нанесення шару CdTe становив 25 хв. Для трьох температур випарника 461 °С, 503 °С та 541 °С, і при температурах осадження, які на 4 °С були нижче відповідних критичних температур (таблиця 1) і становили 353 °С, 398 °С і 439 °С, відповідно, на поверхні гетеросистеми ІТО/ZnO/CdS були отримані плівки телуриду кадмію товщиною 4 мкм.

Дослідження кристалічної структури плівок телуриду кадмію було проведено за допомогою рентгендифрактометричного аналізу. Фазовий аналіз показав, що в зазначених режимах формуються плівки телуриду кадмію стабільної кубічної модифікації, про що однозначно свідчить наявність рефлексів (111), (400), (511), (220), (311) і (422) (рис. 5). Оскільки товщина шарів CdTe становила 4 мкм, то дифракційні піки від шарів CdS і ІТО на рівні фону не виділялися. Аналітична обробка рентгендифрактограм дозволила визначити напівширину дифракційного максимуму (111) телуриду кадмію, яка є інтегральним показником структурної досконалості плівкових шарів. Було встановлено, що зі збільшенням температури підкладки спостерігається монотонне зростання півширини дифракційного максимуму (111) від $B_{111} = 0,13$ при $T_n = 353$ °С до $B_{111} = 0,09$ при $T_n = 439$ °С. Таким чином, найбільш структурно досконалі плівки телуриду кадмію було отримано при температурі підкладки 439 °С.

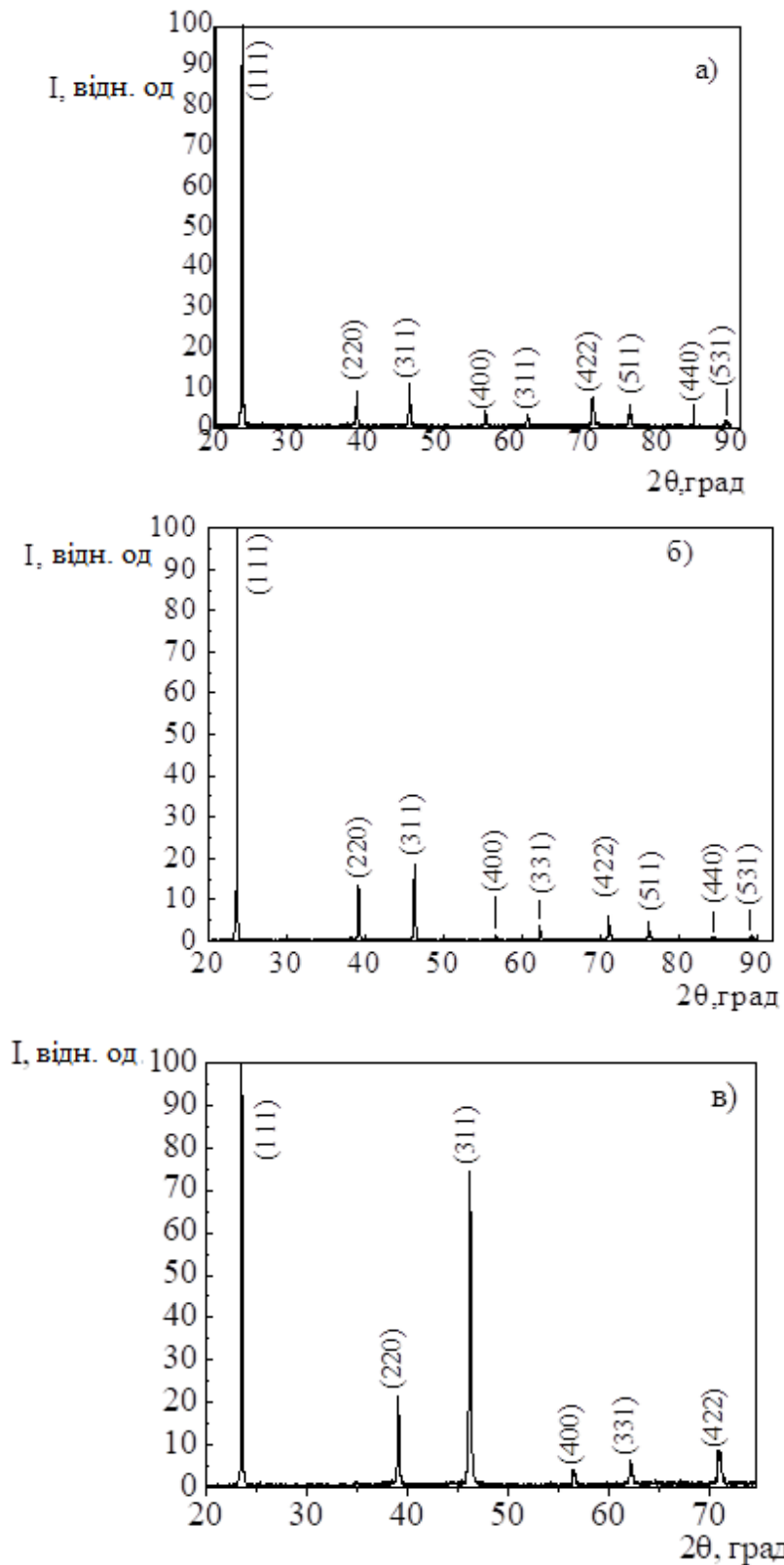


Рис. 5. Дифрактограми плівок телуриду кадмію отримані при різних температурах підкладки: а) $T_{\text{п}} = 353\text{ }^{\circ}\text{C}$, б) $T_{\text{п}} = 398\text{ }^{\circ}\text{C}$, в) $T_{\text{п}} = 439\text{ }^{\circ}\text{C}$

Висновки. В роботі запропоновано та проведено апробацію технологічної оснастки для виготовлення плівок сульфідів та телуриду кадмію на гнучких підкладках шляхом конденсації з квазізамкненого об'єму. Така оснастка дозволяє в єдиному технологічному циклі без порушення вакууму послідовно осаджувати шари сульфідів і телуриду кадмію на поліімідні підкладки в умовах близьких до термодинамічно рівноважних.

Проведені експериментальні дослідження критичної температури конденсації плівок телуриду кадмію в квазізамкненому об'ємі, дозволили визначити температуру випарника в залежності від необхідної температури підкладки, при яких конденсація плівок здійснюється в умовах близьких до термодинамічно рівноважних.

Методом квазізамкненого об'єму із використанням розробленої оснастки при температурі осадження нижче 450 °С на поліїмідних плівках із шаром ІТО, були сформовані шари сульфїду кадмію товщиною не більше 0,3 мкм стабільної гексагональної модифікації, а на їх поверхні шари телуриду кадмію товщиною 4 мкм стабільної кубічної модифікації. Встановлено, що ступінь структурної досконалості шарів телуриду кадмію збільшувалася при збільшенні температури осадження до 439 °С.

Досягнуті параметри кристалічної структури плівок сульфїду та телуриду кадмію, дозволяють використовувати такі плівки, виготовлені методом квазізамкненого об'єму в якості базових шарів гнучких високоефективних сонячних елементів.

Список використаних джерел:

- [1] Wesoff E. First Solar hits record 22.1% conversion efficiency for CdTe solar cell / E. Wesoff // Режим доступу: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/first-solar-hits-record-22-1-conversion-efficiency-for-cdte-solar-cell#gs.5ni6ip>
- [2] Girish Kumar S. Physics and Chemistry of CdTe/CdS Thin Film Heterojunction Photovoltaic Devices: Fundamental and Critical Aspects / S. Girish Kumar, K.S.R. Koteswara Rao // Energy & Environmental Science. - Issue 7(1). – 2013. – pp. 45-102
- [3] de Wild-Scholten (Mariska) M.J. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems / M.J. (Mariska) de Wild-Scholten // Solar Energy Materials and Solar Cells. - Volume 119. - 2013. - Pages 296–305
- [4] Ultra heat-resistant films UPILEX S // Режим доступу: <http://www.upilex.jp/en/upilex.html>
- [5] Бубнов В.З. Вакуумное осаждение пленок в квазізамкнутом объеме / В.З. Бубнов, М.С. Лаир, Ф.Г. Старос, Т.Ф. Филаретов // Советское радио. - М. – 1975. - 161 с.
- [6] Полупроводниковые соединения А^{III}В^V (сборник статей) / под ред. Р. Виллардсона, Х. Геринга // Металлургия. - М. - 1967. – 726 с.
- [7] Медведев В.И. Введение в производство полупроводниковых материалов / В.И. Медведев // Высшая школа. – М. - 1979г. – 503 с.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2019