

УДК 538.9

doi:10.20998/2413-4295.2024.04.02

КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА БАЗОВИХ ШАРІВ ТЕЛУРИДУ КАДМІЮ ПЛАНАРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАХИСТУ НВЧ АПАРАТУРИ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ

Г. С. ХРИПУНОВ¹, М. М. ХАРЧЕНКО¹, А. І. ДОБРОЖАН¹, М. С. ХРИПУНОВ¹,
Т. М. ШЕЛЕСТ^{*2}, Р. І. САПРИКІН¹

¹ кафедра мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² кафедра фізики, національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: tetiana.shelest@khi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Для створення фізичних основ промислової технології планарних елементів захисту рентгендіфрактометричним методом були досліджені базові шари телуриду кадмію, які були отримані методом термічного вакуумного випаровування при різних температурах підкладки на полікорових пластинах з прошарком молібдену. Було визначено температурні інтервали, які відповідають якійсь зміні кристалічної структури плівок телуриду кадмію. Показано, що плівки телуриду кадмію, отримані при температурі підкладки, яка не перевищує 100°C, містять тільки гексагональну метастабільну фазу, мають переважну орієнтацію в напрямку [002], рівень мікродоформатії становить 0.088 - 0.110, розмір областей когерентного розсіювання – 15.6 - 21.5 нм. Визначені періоди гексагональної кристалічної решітки $a = 4.586 \text{ \AA}$ та $c = 7.505 \text{ \AA}$ свідчать про наявність значних макродеформацій розтягнення. Збільшення температури осадження до 200°C призводить до появи поряд з метастабільною гексагональною фазою телуриду кадмію стабільної кубічної фази, орієнтованої в напрямку [111]. При цьому орієнтація гексагональної фази в напрямку [002] зменшується з $G_H = 1.74$ до $G_H = 1.45$. Поява кубічної фази також призводить до зменшення мікродоформатії та розмірів областей когерентного розсіювання гексагональної фази до 0.029 - 0.043 нм та 12.1 - 15.8 нм, відповідно. Подальше збільшення температури підкладки призводить до формування плівок телуриду кадмію, в яких наявна тільки стабільна кубічна фаза без переважної орієнтації. При цьому збільшення температури підкладки до 300°C призводить до зменшення макродеформацій кубічної фази, про що свідчить наближення періоду кристалічної решітки до теоретичного значення: з $a = 6.4870 \text{ \AA}$ до $a = 6.4858 \text{ \AA}$. Таким чином, експериментально показано, що для забезпечення стабільних вихідних параметрів елементів захисту отримання плівок телуриду кадмію необхідно проводити при температурі підкладки 300°C, оскільки це унеможливує наявність деградаційних процесів, обумовлених термодинамічно активованим перетворенням метастабільної гексагональної фази в стабільну кубічну фазу.

Ключові слова: плівки телуриду кадмію; планарні елементи захисту; рентгенівська дифрактометрія; фазовий аналіз; мікро деформатії.

THE CRYSTAL STRUCTURE OF THE BASIC LAYERS OF CADMIUM TELLURIDE IN PLANAR ELEMENTS FOR PROTECTING MICROWAVE EQUIPMENT FROM ELECTROMAGNETIC PULSES

G. KHRYPUNOV¹, N. KHARCHENKO¹, A. DOBROZHAN¹, M. KHRYPUNOV¹, T. SHELEST²,
R. SAPRYKIN¹

¹ Department of Micro- and Nanoelectronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Department of Physics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT To create the physical basis of the industrial technology of planar protection elements, base layers of cadmium telluride, which were obtained by the method of thermal vacuum evaporation at different substrate temperatures on polycore plates with a molybdenum interlayer, were investigated using the X-ray diffractometric method. Temperature intervals corresponding to a qualitative change in the crystal structure of cadmium telluride films were determined. It is shown that the cadmium telluride films obtained at a substrate temperature that does not exceed 100°C contain only the hexagonal metastable phase, have a predominant orientation in the [002] direction, the level of microdeformation is 0.088 - 0.110, the size of the coherent scattering regions is 15.6 - 21.5 nm. The determined periods of the hexagonal crystal lattice $a = 4.586 \text{ \AA}$ and $c = 7.505 \text{ \AA}$ indicate the presence of significant tensile macrodeformations. An increase in the deposition temperature to 200°C leads to the appearance of a stable cubic phase oriented in the [111] direction along with the metastable hexagonal phase of cadmium telluride. At the same time, the orientation of the hexagonal phase in the [002] direction decreases from $G_H = 1.74$ to $G_H = 1.45$. The appearance of the cubic phase also leads to a decrease in microdeformations and the dimensions of the coherent scattering regions of the hexagonal phase to 0.029 - 0.043 nm and 12.1 - 15.8 nm, respectively. A further increase in the temperature of the substrate leads to the formation of cadmium telluride films in which there is only a stable cubic phase without a preferred orientation. At the same time, an increase in the temperature of the substrate to 300°C leads to a decrease in the macrodeformations of the cubic phase, which is evidenced by the approach of the period of the crystal lattice to the theoretical value: from $a = 6.4870 \text{ \AA}$ to $a = 6.4858 \text{ \AA}$. Thus, it was experimentally shown that in order to ensure stable initial parameters of protection elements, the production of cadmium telluride films must be carried out at a

substrate temperature of 300°C, as this prevents the presence of degradation processes due to the thermodynamically activated transformation of the metastable hexagonal phase into a stable cubic phase.

Keywords: *cadmium telluride films; planar protection elements; X-ray diffraction; phase analysis; micro deformations.*

Вступ

Сучасною актуальною прикладною проблемою фізичного матеріалознавства для мікроелектроніки є створення фізичних основ нових приладових smart структур для захисту електронних систем управління та живлення радіоелектронної апаратури (РЕА) від впливу мікро- та наносекундних імпульсів електромагнітного випромінювання штучного походження [1]. Під впливом НВЧ електромагнітних імпульсів (ЕМІ) в електричних ланцюгах індукуються імпульси перенапруги, що може мати серйозний згубний вплив на елементи радіоелектронної НВЧ апаратури [2]. Напівпровідникові радіоелектронні прилади особливо чутливі до руйнуючого впливу ЕМІ завдяки властивостям *p-n* переходу та специфічній теплопровідності напівпровідникових матеріалів [3]. Зі зменшенням розмірів елементів конструкцій напівпровідникових пристроїв рівень енергії, який призводить до їхнього пошкодження, знижується для інтегральних схем від 10^{-3} Дж до 10^{-7} Дж. Для забезпечення захисту електричних кіл використовуються елементи захисту РЕА від НВЧ ЕМІ. Найважливішою їх властивістю є їх здатність знижувати електричний опір з 10^4 - 10^{10} Ом за час порядку кількох наносекунд до величини, значно нижчої, ніж вхідний опір елемента РЕА, коли напруга в електричному колі перевищує порогову напругу [4].

Поряд з перемиканням під дією електричних імпульсів суттєвий інтерес становлять елементи перемикання під дією світлових імпульсів. Дослідження ефектів перемикання в напівпровідникових халькогенідних плівках під впливом оптичної високочастотної генерації зараз зосереджено на плівках диселеніду платини [5]. В [6] було показано, що оснащення метаповерхні активними матеріалами дозволяє динамічно керувати ТГц хвилями, що надзвичайно важливо для реалізації майбутніх телекомунікацій шостого покоління. Так в [7] досліджено радіочастотні перемикачі з оптичним керуванням та новою архітектурою безконтактного пристрою, яка забезпечує високу продуктивність у діапазоні від міліметрових хвиль до терагерц. Значна зміна провідності в напівпровідниках, викликана фотогенерованими носіями заряду, використовується для розробки радіочастотних перемикачів з дуже високою продуктивністю. Дослідження ефектів оптично індукованого перемикання для CdTe мають поодинокий характер [7], в той же час плівки телуриду кадмію мають відмінну фоточутливість [8], що дозволяє створювати на їх основі високоефективні сонячні елементи [9]. Зараз плівкові сонячні елементи на основі телуриду кадмію мають широкомасштабне наземне застосування [10].

Нами було досліджено ефекти перемикання в плівках телуриду кадмію під дією мікро - та наносекундних імпульсів [11,12]. Експериментально було встановлено, що шари CdTe товщиною від 3 мкм до 7 мкм можуть бути використані для створення елементів захисту широкої номенклатури електронної техніки та було запропоновано базове рішення такого елемента. Це рішення засноване на властивостях зразків, які являли собою плівкові шари CdTe, діаметром 2 мм, сформовані на підкладках з молібденової фольги і розміщені в корпусі НВЧ діодів. Для створення електричного контакту до поверхні плівки телуриду кадмію були використані електроди, які являли собою молібденові притискні стрижні. При подачі на зразки імпульсного ЕМВ тривалістю 1 мкм вони мали час перемикання між станами з високим та низьким електроопором близько 2 нс і ємність не більше 2 пФ. Проте, більш адаптованою до промислового впровадження є планарна структура елементів захисту, при реалізації якої плівка телуриду кадмію формується на пластині з полікору (полікристалічний Al_2O_3) з плівковим прошарком молібдену, а верхній електрод являє собою плівку молібдену, яка нанесена на базовий шар методом магнетронного розпилення [13]. В таких приладових структурах було досліджено ефекти перемикання в плівках телуриду кадмію під дією наносекундних імпульсів. Було експериментально встановлено, що при проходженні надвисокочастотного високовольтного імпульсу тривалістю 30-100 нс за час, який не перевищує 2 нс, стрибком зменшується питомий електричний опір. Це забезпечує стікання енергії імпульсу крізь елемент захисту, який має ресурс не менше 1000 спрацювань.

Для промислового впровадження розроблених планарних елементів захисту необхідно розробити фізичні основи їх конструктивно-технологічних рішень. Важливим етапом розробки таких фізичних основ є визначення фізичних механізмів впливу умов отримання плівкових шарів телуриду кадмію на їхню кристалічну структуру.

Мета роботи

Метою роботи було проведення дослідження впливу температури підкладки на кристалічну структуру плівок телуриду кадмію, отриманих методом термічного випаровування на підкладках з полікору з плівковим прошарком молібдену. В роботі ця задача вирішувалася шляхом аналітичної обробки експериментальних дифрактограм плівок телуриду кадмію.

Методика експерименту

Традиційно для отримання плівок телуриду кадмію застосовують осадження в замкненому об'ємі.

[14]. Це обумовлено тим що осадження телуриду кадмію відбувається при високій температурі підкладки [15] в умовах, близьких до термодинамічної рівноваги. Проте більш адаптованим для промислового застосування є метод термічного вакуумного випаровування [16,17]. Для дослідження були виготовлені тонкоплівкові композиції Mo/CdTe на підкладці з полікору (Al_2O_3). Плівки Mo товщиною 0.5 мкм були отримані методом магнетронного розпилення при температурі підкладки $130^\circ C$, тиску 0.7 - 0.9 Па, потужності магнетрону 30 - 125 Вт, час напilenня складав 8 хв.

Для отримання шарів телуриду кадмію методом термічного вакуумного випаровування була використана модернізована промислова вакуумна установка УВН-67. Ця установка дозволяє реалізувати метод термічного вакуумного випаровування при використанні резистивних випарників потужністю до 2 кВт. Установка має розмір робочої зони 0.12 м^3 , що дозволяє наносити плівки телуриду кадмію на підкладки розміром $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$. Вихідний вакуум становив $8 \cdot 10^{-4}$ Па, робочий тиск у вакуумній камері в процесі осадження підтримувалося на рівні $1.3 \cdot 10^{-3}$ Па. Для нагрівання підкладки був використаний стрічковий нагрівач виготовлений з листового молібдену товщиною 80 мкм. Контроль температури підкладки в процесі осадження плівки телуриду кадмію здійснювався хромель-алюмелевою термопарою, встановленою на фронтальній поверхні підкладки.

Для випаровування плівок телуриду кадмію був розроблений графітовий випарювач з непрямим нагрівом від двох електрично ізольованих нагрівачів, виготовлених з молібденового дроту діаметром 1.2 мм (рис. 1).

Контроль температури випаровування здійснювався термопарою, яка встановлювалася в об'ємі нагрівача безпосередньо під зоною розміщення шихти телуриду кадмію чистотою 99,999% з розміром частинок на рівні 1 мм. Час нагрівання випарника до температур випаровування $700 - 750^\circ C$ становив 260 - 275 с. Для досягнення зазначених швидкостей, рівномірності нагріву, просторової однорідності парового потоку на графітовий випарник була виготовлена кришка з дірками. Точність підтримки температури випарника була на рівні $5^\circ C$.

Для контролю показників термопар підкладки і випарника був використаний цифровий мультиметр MS8040, який підключався через механічний комутатор до термопар. Для проведення досліджень були отримані плівки телуриду кадмію товщиною 4 мкм. Час осадження плівок телуриду кадмію товщиною 4 мкм, описаним вище методом термічного вакуумного випаровування, становив 10 хвилин.

Фазовий склад та кристалічну структуру отриманих плівок телуриду кадмію було досліджено методом рентгенівської дифракції. Цей метод широко використовують для аналізу кристалічної структури плівок телуриду кадмію [18,19]. Дифрактограми було

отримано на дифрактометрі D8 DISCOVER (BRUKER) за схемою θ - 2θ сканування у випромінюванні мідного аноду за допомогою цифрової реєстрації. Шаг сканування складав 0.01° . При такій зйомці дифракційну картину формують зерна, в яких площини (hkl), що відбивають, розташовані паралельно поверхні зразка.



Рис. 1 – Графітовий випарник телуриду кадмію:
1, 2 – струмові вводи; 3 – графітовий тигель з кришкою; 4 – нагрівальні елементи; 5 – термопара

Первинна обробка дифракційних максимумів проводилася за допомогою комп'ютерної програми «New profile». Така обробка дозволяла визначити положення дифракційного максимуму ($2\theta_0$), міжплощинну відстань (d) і інтегральну інтенсивність (I). Після первинної обробки дифракційних максимумів здійснювалося прецизійне визначення періоду решітки шарів телуриду кадмію з використанням екстраполяційної функції $f(\theta) = \cos^2\theta$ за допомогою методу найменших квадратів. Для визначення переважної орієнтації плівок, шляхом аналітичної обробки дифракційних максимумів, розраховувалися текстурні коефіцієнти C_i [20]:

$$C_i = \frac{NI_i}{I_{i0} \sum_{i=1}^N I_i / I_{i0}}, \quad (1)$$

де I_i – інтенсивність виявленого i -піку; I_{i0} – інтенсивність i піку згідно з таблицею ASTM; N – число дифракційних максимумів, виявлених при аналізі (відбиття відповідні кратним індексам не враховуються).

Для зіставлення зразків за ступенем переважної орієнтації розраховувався параметр G

$$G = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (C_i - 1)^2}. \quad (2)$$

Обговорення результатів

Були проведені дослідження впливу температури підкладки на кристалічну структуру плівок телуриду кадмію, сформованих на прошарках молибдену в структурі полікор/Мо/CdTe. Температура підкладки при осадженні плівок телуриду кадмію варіювалася від 100°C до 300°C. При збільшенні

температури осадження визначено кілька температурних інтервалів, які відповідають якісним змінам кристалічної структури плівок телуриду кадмію. Дифрактограми характерних зразків полікор/Мо та полікор/Мо/CdTe представлені на рис.2 - 4. На дифрактограмах ідентифіковані рефлекси, які належать Мо і CdTe, всі інші рефлекси належать підкладці.

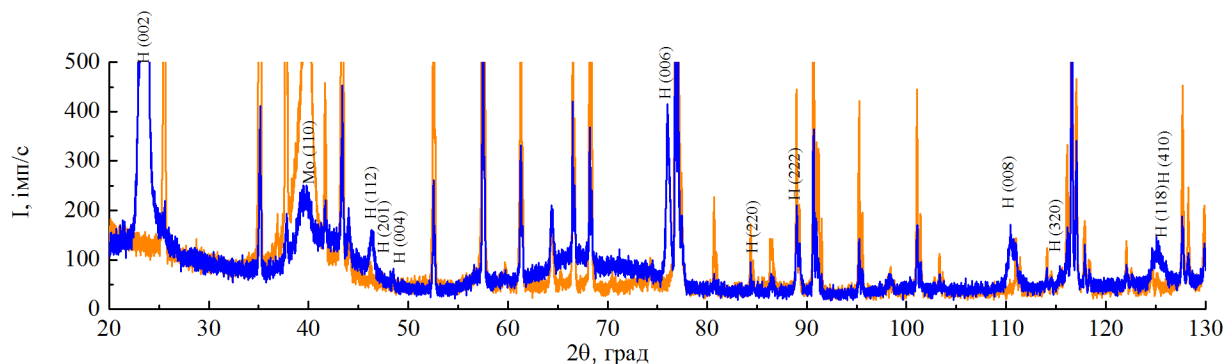


Рис. 2 – Рентгендифрактограма зразка, отриманого при температурі осадження плівки телуриду кадмію 100°C: жовта лінія – дифракційний спектр полікор/Мо; синя лінія – дифракційний спектр зразка полікор/Мо/CdTe

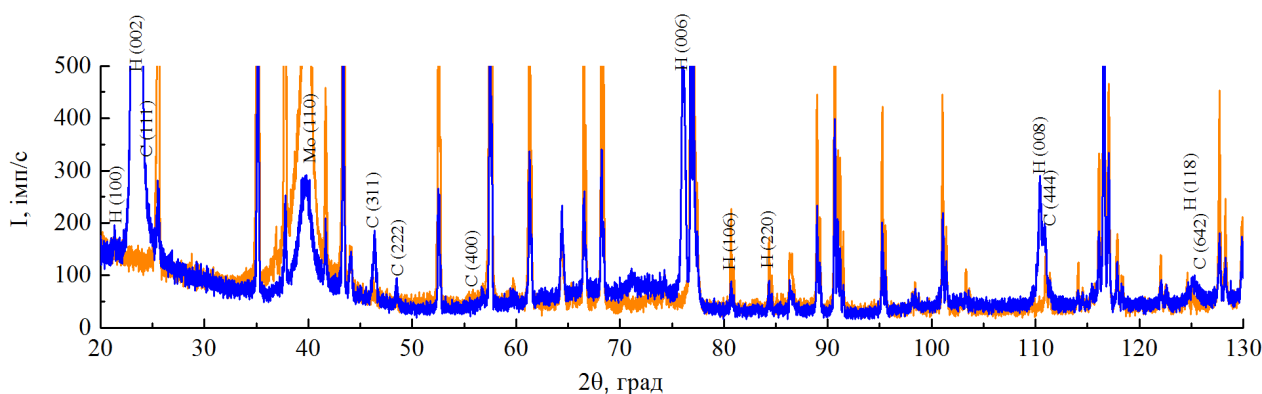


Рис. 3 – Рентгендифрактограма зразка, отриманого при температурі осадження плівки телуриду кадмію 200°C: жовта лінія – дифракційний спектр полікор/Мо; синя лінія – дифракційний спектр зразка полікор/Мо/CdTe

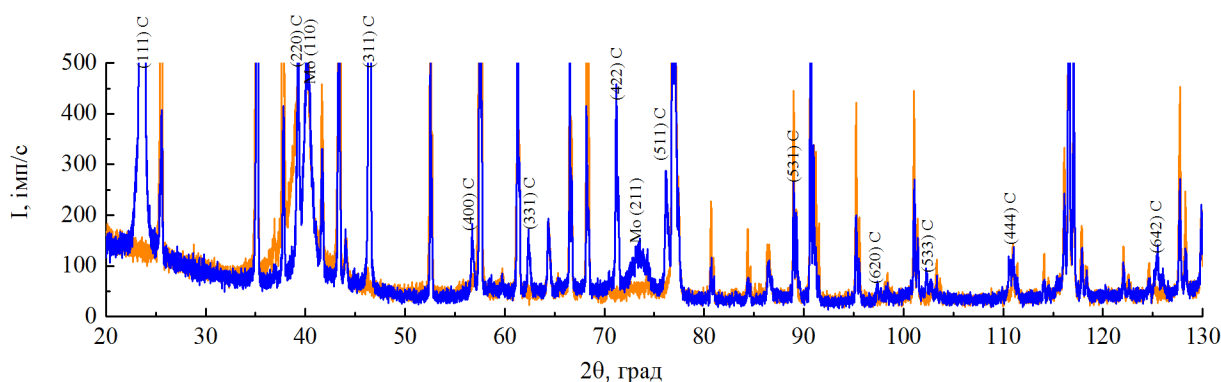


Рис. 4 – Рентгендифрактограма зразка, отриманого при температурі осадження плівки телуриду кадмію 300°C: жовта лінія – дифракційний спектр полікор/Мо; синя лінія – дифракційний спектр зразка полікор/Мо/CdTe

Оскільки полікристалічний полікор та молібден має значну кількість дифракційних максимумів, то сумісне представлення дифракційних спектрів зразків полікор/Мо та полікор/Мо/CdTe спрощує проведення аналізу дифракційного спектру плівки телуриду кадмію.

У зразках, отриманих при температурі осадження 100°C, була виявлена гексагональна метастабільна фаза (H) телуриду кадмію, про що свідчить наявність дифракційних максимумів від сімейства кристалографічних площин (002), (112), (201), (004), (006), (220), (222), (008), (320), (118),

(410). При цьому спостерігалось переважна орієнтація плівок в напрямку [002]. Ступінь переважної орієнтації виявленої гексагональної фази складала $G_H = 1.74$. Результати аналізу дифракційних спектрів представлені в табл.1. При аналізі були визначені положення ($2\theta_c$), інтенсивність (I) та ширина (W) експериментальних дифракційних піків. Також в табл.1 наведене теоретичне положення відповідних дифракційних максимумів ($2\theta_T$) та експериментальне значення міжплощинної відстані (d).

Таблиця 1 – Аналіз дифракційних спектрів плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 100°C

[hkl]	$2\theta_T$	$2\theta_c$	$d, \text{Å}$	Int. ints	$W_{int}, \text{град}$
H (002)	23.70727	23.707	3.74986	5433	0.18057
H (112)	46.4242	46.417	1.95457	14.34	0.38832
H (201)	47.33188	47.258	1.921751	1.637	0.28135
H (004)	48.5136	48.457	1.876943	3.603	0.2083
H (006)	76.15605	76.029	1.250703	91.643	0.35063
H (220)	84.55981	84.538	1.145166	0.423	0.075
H (222)	89.30878	89.356	1.09548	4.858	0.34289
H (008)	110.501	110.418	0.9379188	58.126	0.67243
H (320)	115.674	115.402	0.91125	2.39	0.14466
H (118)	125.207	125.019	0.8682965	34.489	0.76197
H (410)	125.738	125.69	0.8656724	2.54	0.27298

Аналіз даних табл.1 показує, що положення експериментальних дифракційних максимумів спостерігається при менших кутах у порівнянні з теоретичними положеннями дифракційних максимумів гексагональної фази телуриду кадмію. Відповідно експериментальні значення міжплощинних відстаней менше теоретичних, що свідчить про наявність макродеформацій розтягнення. Так, експериментальні значення періоду кристалічної решітки плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 100°C, склали $a = 4.586 \text{ Å}$, $c = 7.505 \text{ Å}$ (табл.2), а теоретичні значення складають $a = 4.580 \text{ Å}$, $c = 7.500 \text{ Å}$ [JCPDS card № 19-0193].

Наявність кратних дифракційних максимумів дозволила визначити розмір областей когерентного розсіювання (о.к.р.) ($L, \text{нм}$) та величину мікродеформацій (ϵ) (табл.2).

Таблиця 2 – Структурні параметри плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 100°C

	$L, \text{нм}$		ϵ	
	min	max	min	max
H[001]	15.6	21.5	0.088	0.110
	$a \text{ Å}$		$c \text{ Å}$	
	4.586		7.505	

У зразках, отриманих при температурі підкладки 200°C, була виявлена не тільки гексагональна метастабільна фаза (H) телуриду кадмію, про що свідчить наявність дифракційних максимумів від сімейства кристалографічних площин (100), (002), (006), (106), (220), (008), (118), а й стабільна кубічна фаза (C), про що свідчить наявність дифракційних максимумів від сімейства кристалографічних площин (111), (311), (222), (440), (531). При цьому переважна орієнтація гексагональної фази спостерігалась в напрямку [002], а кубічної фази - в напрямку [111]. Збільшення температури підкладки з 100°C до 200°C при осадження плівок телуриду кадмію приводить до того, що ступінь переважної орієнтації гексагональної фази в напрямку [002] зменшується з $G_H = 1.74$ до $G_H = 1.45$. Ступінь переважної орієнтації кубічної фази складала $G_C = 1.25$. Результати аналізу дифракційних спектрів представлені в табл. 3 та 4.

Аналіз даних табл.4 показує, що положення експериментальних дифракційних максимумів для кубічної фази плівок телуриду кадмію спостерігається при менших кутах у порівнянні з теоретичними положеннями дифракційних максимумів відповідних фаз.

Таблиця 3 – Аналіз дифракційних спектрів гексагональної фази плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 200°C

[hkl]	$2\theta_t$	$2\theta_c$	$d, \text{Å}$	Int. ints	W_{int} , град
H(100)	22.31939	22.28055	3.98659	0.75	0.11254
H(002)	23.70727	23.67	3.75569	5327	0.1514
H(006)	76.15605	76.03679	1.25059	132.5	0.24859
H(106)	80.35261	80.367	1.193754	1.878	0.23686
H(220)	84.55981	84.6	1.144488	0.791	0.167
H(008)	110.501	110.413	0.9379451	51.437	0.30328
H(118)	125.207	125.095	0.8679978	7.779	0.32356

Таблиця 4 – Аналіз дифракційних спектрів кубічної фази плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 200°C

[hkl]	$2\theta_t$	$2\theta_c$	$d, \text{Å}$	Int. ints	W_{int} , град
C(111)	23.756	23.732	3.745928	1105	0.09144
C(311)	46.424	46.338	1.957733	19.488	0.25613
C(222)	48.612	48.47501	1.87629	6.05	0.20304
C(400)	56.764	56.66792	1.62292	1.85	0.16136
C(444)	110.838	110.617	0.9367922	13.6	0.26467
C(642)	125.569	125.392	0.8668339	5.453	0.3162

Відповідно, експериментальні значення періоду кристалічної решітки кубічної фази плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 200°C, $a = 6.4870 \text{ Å}$ (табл. 5), що більше теоретичного значення, яке дорівнює $a = 6.481 \text{ Å}$ [JCPDS card № 15-0770]. Таким чином, в кубічній фазі наявні розтягуючі макродеформації. Експериментальні значення періоду кристалічної решітки гексагональної фази плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі осадження 200°C, склали $a = 4.578 \text{ Å}$, $c = 7.504 \text{ Å}$ (табл.5).

Таблиця 5 – Структурні параметри плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 200°C

	$L, \text{нм}$		ε	
	min	max	min	max
H [001]	12.1	15.8	0.029	0.043
C [111]	11.3	14.4	0.018	0.025
	$a \text{ Å}$		$c \text{ Å}$	
H:	4.578		7.504	
C:	6.4870			

Таким чином, період a кристалічної решітки менше свого теоретичного значення, що

свідчить про наявність макродеформацій стиснення в цьому напрямку кристалічної решітки, а період c більше свого теоретичного значення, що свідчить про наявність макродеформацій розтягнення в цьому напрямку кристалічної решітки [JCPDS card № 19-0193].

Як видно з порівняння результатів, наведених в табл. 2 та 5, розмір о.к.р. гексагональної фази L в плівках телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 200°C, та рівень мікродеформації ε менше, ніж в плівках, отриманих при температурі підкладки 100°C. Це зумовлено появою стабільної кубічної фази поряд з метастабільною гексагональною фазою. Співвідношення між кубічною та гексагональною фазами, яке було розраховано за інтегральною інтенсивністю, складає: кубічної фази C 17% та гексагональної фази H 83%.

Результати аналізу дифракційних спектрів плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 300°C, представлені в табл.6. У цих зразках була виявлена тільки стабільна кубічна фаза, про що свідчить віддзеркалення від відповідних кристалографічних площин (табл. 6).

Розрахунки показують, що плівки телуриду кадмію, які отримані в цих умовах, практично не мають переважної орієнтації ($G_C = 1.09$).

Таблиця 6 – Аналіз дифракційних спектрів кубічної фази плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 300°C

[hkl]	$2\theta_r$	$2\theta_c$	$d, \text{Å}$	Int. ints	W_{Int} , град
C (111)	23.756	23.724	3.747128	2035	0.15209
C (220)	39.282	39.237	2.29412	85.295	0.27328
C (311)	46.424	46.385	1.955856	168.429	0.17457
C (400)	56.764	56.70698	1.6219	16.09	0.18354
C (331)	62.396	62.36026	1.48775	19.49	0.19879
C (422)	71.208	71.16995	1.32367	62.05	0.18364
C (511)	76.267	76.1814	1.24857	43.71	0.22269
C (531)	89.344	89.271	1.096305	12.271	0.25103
C (620)	97.457	97.37058	1.02551	6.55	0.25729
C (533)	102.387	102.329	0.98884	8.29	0.22996
C (444)	110.838	110.659	0.936552	20.299	0.38219
C (642)	125.569	125.446	0.866622	25.06	0.41662

Аналіз даних табл.6 показує, що положення експериментальних дифракційних максимумів спостерігається при менших кутах в порівнянні з теоретичними положеннями дифракційних максимумів кубічної фази телуриду кадмію. Відповідно експериментальні значення міжплощинних відстаней більше теоретичних, що свідчить про наявність макродеформацій розтягнення. Експериментальні значення періоду кристалічної ґратки плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 300°C, складала $a = 6.4858 \text{ Å}$ (табл.7).

Таким чином, як впливає з порівняння результатів, наведених в табл.2 та 7, при зростанні температури від 200°C до 300°C рівень макродеформацій розтягнення зменшується. Розрахунок структурних параметрів (табл.7) показує, що при такому зростанні температури осадження розмір о.к.р. кубічної фази зменшується, а рівень мікродеформацій збільшується, що впливає з порівняння результатів, наведених в табл.5 та 7.

Таблиця 7 – Структурні параметри плівок телуриду кадмію, отриманих при температурі підкладки 300°C

	$L, \text{нм}$		ϵ	
	min	max	min	max
C [111]	11.2	12.5	0.026	0.05
$a \text{ Å}$				
6.4858				

Висновки

Досліджено еволюцію кристалічної структури плівок телуриду кадмію, отриманих методом термічного вакуумного випаровування, які застосовуються в якості базових шарів планарних елементів захисту НВЧ апаратури від електромагнітних імпульсів. Показано, що плівки телуриду кадмію, отримані при температурі підкладки, яка не перевищує 100°C, містять тільки гексагональну метастабільну фазу, мають переважну орієнтацію в напрямку [002] та значні макродеформації розтягнення. Збільшення температури підкладки до 200°C приводить до появи поряд з метастабільною гексагональною фазою телуриду кадмію стабільної кубічної фази, орієнтованої в напрямку [111]. При цьому переважна орієнтація гексагональної фази в напрямку [002] зменшується. Наявність двох фаз також приводить до зменшення мікродеформацій та розмірів о.к.р. гексагональної фази. Подальше збільшення температури підкладки приводить до формування плівок телуриду кадмію, в яких наявна тільки стабільна кубічна фаза телуриду кадмію без переважної орієнтації. При цьому збільшення температури підкладки з 200°C до 300°C приводить до зменшення макродеформацій. Таким чином, для забезпечення стабільних вихідних параметрів елементів захисту отримання плівок телуриду кадмію необхідно проводити при температурі підкладки 300°C, оскільки це унеможливило наявність деградаційних процесів, обумовлених термодинамічно активованим перетворення

метастабільної гексагональної фази в стабільну кубічну фазу. При більш високих температурах підкладки різко знижується швидкість росту шару CdTe.

Список літератури

- Gurevich V. I. Stability of microprocessor relay protection and automation systems against intentional destructive electromagnetic impacts. *Electrical engineering and electromechanics*. 2011. Vol. 5. P. 23-28.
- Солодов А., Пірогов Ю., Ключник А. *Стійкість ІМС в електромагнітних полях імпульсного радіовипромінювання*. Видавництво: Lambert Academic Publishing. 2012. 84 с.
- Pergament A., Stefanovich G., Malinenko V., Velichko A. Electrical Switching in Thin Film Structures Based on Transition Metal Oxides. *Advances in Condensed Matter Physics*. 2015. Vol. 2015. P. 1-26, doi:10.1155/2015/654840.
- Скорняков С., Павлов В., Рахманов А. Кремнієві обмежувачі напруги – ефективні засоби захисту радіоелектронних пристроїв. *Компоненти і технології*. 2008. № 3. P. 70-74.
- Zheng Z. S., Peng Z., Yu Z. S., Lan H., Wang S. X., Zhang M., Li L., Liang H. W., Su H. Thickness-dependent optical response and ultrafast carrier dynamics of PtSe₂ films. *Results in Physics*. 2022. Vol. 42. P. 106012. doi: 10.1016/j.rinp.2022.106012.
- Lou J., Xu X., Huang Y., Yu Y., Wang J., Fang G., Liang J., Fan C., Chang C. Optically Controlled Ultrafast Terahertz Metadevices with Ultralow Pump Threshold. *Nano and micro small*. 2021. Vol. 17. Issue 44. e2104275, doi: 10.1002/sml.202104275.
- Shi Y., Deng Y., Ren J., Li P., Fay P., and Liu L. Computational analysis of novel high performance optically controlled RF switches for reconfigurable millimeterwave-to-THz circuits. *OSA Continuum*. 2021. Vol. 4, Issue 10. P. 2642-2654. doi: 10.1364/OSAC.437912.
- Abdelfatah M., Darwesh N., Habib M. A., Alduaij O. K., El-Shaer A., Ismail W. Enhancement of Structural, Optical and Photoelectrochemical Properties of n-Cu₂O Thin Films with K Ions Doping toward Biosensor and Solar Cell Applications. *Nanomaterials*. 2023. 13(7). P. 1272, doi: 10.3390/nano13071272.
- Mazur T. M., Mazur M. P., Vakaliuk I. V. Solar cells based on CdTe thin films (II Part). *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. Vol. 24, No. 1. P. 134-145. doi:10.15330/pcss.24.1.134-145.
- Scarpulla M. A., McCandles B., Phillips A. B., Yan Y., Heben M. J., Wolden C., Xiong G., Metzger W. K., Mao D., Krasikov D., Sankin I., Grover S., Munshi A., Sampath W., Sites J. R., Bothwell A., Albin D., Reese M. O., Romeo A., Nardone M., Klie R., Wall J.M., Fiducia T., Abbas A., Hayes S. M. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2023. Vol. 255. P. 112289. doi: 10.1016/j.solmat.2023.112289.
- Khrypunov M. G., Zaitsev R. V., Kudii D. A., Khrypunova A. L. Amplitude-time characteristics of switching in thin films of cadmium telluride. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2018. Vol.10, №1. P. 01016-1– 01016-6. doi: 10.21272/jnep.10(1).01016.
- Khrypunov G. S., Nikitin V. O., Rezinkin O. L., Drozdov A. N., Meriuts A. V., Pirohov O. V., Khrypunov M. G., Kirichenko M. V., Danyliuk A. R., Electron bistability and switching effects in Mo/p-CdTe/Mo structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020. V.31, № 5. P. 3855-3860, doi: 10.1007/s10854-020-02926-6.
- Хрипунов Г. С., Кіріченко М. В., Зайцев Р. В., Дроздов А. М., Меріуц А. В., Нікітін В. О., Хрипунов М. Г. Елемент захисту радіоелектронної апаратури від надвисочастотних електромагнітних імпульсів. *Патент на корисну модель № 146236*. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 03.02.2021 р.
- Sharmin A., Mahmood S. S., Sultana M., Shaikh M. A. A., Bashar M. S. Property enhancement of a close-spaced sublimated CdTe thin film by a post-growth activation step with CdCl₂ and MgCl₂. *Materials Advances*. 2024. Vol. 5. P. 1205-1216. doi: 10.1039/D3MA00734K.
- Sharmin A., Mahmood S. S., Sultana M., Aziz S., Shaikh M. A. A., Bashar M. S. Effect of argon pressure on the physical characteristics of cadmium telluride (CdTe) thin films by close-spaced sublimation. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2023. Vol. 34(5). 344, doi: 10.1007/s10854-022-09603-w
- Gevorgyan V. A., Mangasaryan N. R., Gremenok V. F., Tivanov M. S., Thakur P., Thakur A., Trukhanov S. V., Zubar T. I., Sayyed M. I., Tishkevich D. I., Trukhanov A. V. Morphology and structure of CdCl₂-Containing CdTe films deposited by discrete vacuum thermal evaporation. *Vacuum*. 2023. Vol. 214. P. 112248, doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112248.
- Kumari S., Suthar D., Himanshu, Kumari N., Dhaka M. S., Understanding Grain Growth Mechanism in Vacuum Evaporated CdTe Thin Films by Different Halide Treatments: An Evolution of Ion Size Impact on Physical Properties for Solar Cell Applications. *Comments Inorg. Chem*. 2023. Vol. 43(6). P. 429-464. doi: 10.1080/02603594.2022.2142938.
- Melchor-Robles J. A., Nieto-Zepeda K. E., Vázquez-Barragán N. E., Arreguín-Campos M., Rodríguez-Rosales K., Cruz-Gómez J., Guillén-Cervantes A., Santos-Cruz J., Olvera M. de la L., Contreras-Puente G., de Moure-Flores F. Characterization of CdS/CdTe Ultrathin-Film Solar Cells with Different CdS Thin-Film Thicknesses Obtained by RF Sputtering. *Coatings*. 2024. Vol. 14(4). P. 452. doi: 10.3390/coatings14040452.
- Alshehri K. Investigation on copper doped CdTe thick films for optoelectronic applications: structural, optical and electrical characteristics. *International Journal of Thin Films Science and Technology*. 2024. Vol. 13, №3. P. 235-247, doi: 10.18576/ijfst//130308.
- Moutinho H. R., Hasoon F. S., Abulfotuh F., Kazmerski K. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-space sublimation, and sputtering. *Journal Vacuum Science Technology A*. 1995. Vol.13, №6. P. 2877-2883, doi:10.1116/1.579607.

References (transliterated)

- Gurevich V. I. Stability of microprocessor relay protection and automation systems against intentional destructive electromagnetic impacts. *Electrical engineering and electromechanics*, 2011, Vol. 5, pp. 23-28.
- Solodov A., Pirogov Yu., Klyuchnik A. *Resistance of integrated circuits to electromagnetic fields of pulsed radio emission*. Publisher: Lambert Academic Publishing. 2012. 84 p.
- Pergament A., Stefanovich G., Malinenko V., Velichko A. Electrical Switching in Thin Film Structures Based on Transition Metal Oxides. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2015, Vol. 2015, pp. 1-26, doi: 10.1155/2015/654840.
- Skorniyakov S., Pavlov V., Rakhmanov A. Silicon voltage suppressors – effective means of protection of electronic devices. *Components and technologies*, 2008, 3, pp. 70-74.
- Zheng Z. S., Peng Z., Yu Z. S., Lan H., Wang S. X., Zhang M., Li L., Liang H. W., Su H. Thickness-dependent optical response and ultrafast carrier dynamics of PtSe₂ films. *Results in Physics*, 2022, Vol. 42, pp. 106012, doi: 10.1016/j.rinp.2022.106012.
- Lou J., Xu X., Huang Y., Yu Y., Wang J., Fang G., Liang J., Fan C., Chang C. Optically Controlled Ultrafast Terahertz Metadevices with Ultralow Pump Threshold. *Nano and micro small*, 2021, Vol. 17, Issue 44, e2104275, doi: 10.1002/sml.202104275.
- Shi Y., Deng Y., Ren J., Li P., Fay P., and Liu L. Computational analysis of novel high performance optically controlled RF switches for reconfigurable millimeterwave-to-THz circuits. *OSA Continuum*, 2021, Vol. 4, Issue 10, pp. 2642-2654, doi: 10.1364/OSAC.437912.
- Abdelfatah M., Darwesh N., Habib M. A., Alduaij O. K., El-Shaer A., Ismail W. Enhancement of Structural, Optical and Photoelectrochemical Properties of n-Cu₂O Thin Films with K Ions Doping toward Biosensor and Solar Cell Applications. *Nanomaterials*, 2023, 13(7), pp. 1272, doi: 10.3390/nano13071272.
- Mazur T. M., Mazur M. P., Vakaliuk I. V. Solar cells based on CdTe thin films (II Part). *Physics and Chemistry of Solid State*, 2023, Vol. 24, No.1, pp. 134-145, doi: 10.15330/pcss.24.1.134-145.
- Scarpulla M. A., McCandles B., Phillips A. B., Yan Y., Heben M. J., Wolden C., Xiong G., Metzger W. K., Mao D., Krasikov D., Sankin I., Grover S., Munshi A., Sampath W., Sites J. R., Bothwell A., Albin D., Reese M. O., Romeo A., Nardone M. Klie R., Wall J. M., Fiducia T., Abbas A., Hayes S. M. CdTe-based thin film photovoltaics: Recent advances, current challenges and future prospects. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, Vol. 255, pp. 112289, doi: 10.1016/j.solmat.2023.112289.
- Khrypunov M. G., Zaitsev R. V., Kudii D. A., Khrypunova A. L. Amplitude-time characteristics of switching in thin films of cadmium telluride. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2018, Vol.10, №1, pp. 01016-1–01016-6, doi: 10.21272/jnep.10(1).01016.
- Khrypunov G. S., Nikitin V. O., Rezinkin O. L., Drozdov A. N., Meriuts A. V., Pirohov O. V., Khrypunov M. G., Kirichenko M. V., Danyliuk A. R. Electron bistability and switching effects in Mo/p-CdTe/Mo structure. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, V.31, № 5, pp. 3855-3860, doi: 10.1007/s10854-020-02926-6.
- Khripunov G. S., Kirichenko M. V., Zaitsev R. V., Drozdov A. M., Meriuts A. V., Nikitin V. O., Khripunov M. G. Element of protection of radio-electronic equipment from over-frequency electromagnetic pulses. *Patent for the korisna model No. 146236*. Registered in the State Register of Patents of Ukraine for the korisna model on 02/03/2021.
- Sharmin A., Mahmood S. S., Sultana M., Shaikh M. A. A., Bashar M. S. Property enhancement of a close-spaced sublimated CdTe thin film by a post-growth activation step with CdCl₂ and MgCl₂. *Materials Advances*, 2024, Vol. 5, pp. 1205-1216, doi: 10.1039/D3MA00734K.
- Sharmin A., Mahmood S. S., Sultana M., Aziz S., Shaikh M. A. A., Bashar M. S. Effect of argon pressure on the physical characteristics of cadmium telluride (CdTe) thin films by close-spaced sublimation. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2023, Vol. 34(5), 344, doi: 10.1007/s10854-022-09603-w.
- Gevorgyan V. A., Mangasaryan N. R., Gremenok V. F., Tivanov M. S., Thakur P., Thakur A., Trukhanov S. V., Zubar T. I., Sayyed M. I., Tishkevich D. I., Trukhanov A. V. Morphology and structure of CdCl₂-Containing CdTe films deposited by discrete vacuum thermal evaporation. *Vacuum*, 2023, Vol. 214, pp. 112248, doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112248.
- Kumari S., Suthar D., Himanshu, Kumari N., Dhaka M. S., Understanding Grain Growth Mechanism in Vacuum Evaporated CdTe Thin Films by Different Halide Treatments: An Evolution of Ion Size Impact on Physical Properties for Solar Cell Applications. *Comments Inorg. Chem.*, 2023, Vol. 43(6), pp. 429–464, doi: 10.1080/02603594.2022.2142938.
- Melchor-Robles J. A., Nieto-Zepeda K. E., Vázquez-Barragán N. E., Arreguín-Campos M., Rodríguez-Rosales K., Cruz-Gómez J., Guillén-Cervantes A., Santos-Cruz J., Olvera M. de la L., Contreras-Puente G., de Moure-Flores F. Characterization of CdS/CdTe Ultrathin-Film Solar Cells with Different CdS Thin-Film Thicknesses Obtained by RF Sputtering. *Coatings*, 2024, Vol. 14(4), pp. 452, doi: 10.3390/coatings14040452.
- Alshehri K. Investigation on copper doped CdTe thick films for optoelectronic applications: structural, optical and electrical characteristics. *International Journal of Thin Films Science and Technology*, 2024, Vol. 13, №.3, pp. 235-247, doi: 10.18576/ijfst//130308.
- Moutinho H. R., Hasoon F. S., Abulfotuh F., Kazmerski K. Investigation of polycrystalline CdTe thin films deposited by physical vapor deposition, close-space sublimation, and sputtering. *Journal Vacuum Science Technology A*, 1995, Vol. 13, 6, pp. 2877-2883, doi: 10.1116/1.579607.

Відомості про авторів (About authors)

Хрипунов Геннадій Семенович – доктор технічних наук, професор, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: khrip@ukr.net.

Khrypunov Gennadiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-5938>; e-mail: khrip@ukr.net.

Доброжан Андрій Ігорович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>. e-mail: dobr.abs@gmail.com.

Dobrozhan Andrii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer, Department of Micro- and Nanoelectronics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8830-0942>; e-mail: dobr.abs@gmail.com.

Хрипунов Михайло Семенович – аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8623-5174>; e-mail: mykhailo.khrypunov@infiz.khpi.edu.ua.

Khrypunov Mykhailo – PhD student, Department of Micro- and Nanoelectronics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8623-5174>; e-mail: mykhailo.khrypunov@infiz.khpi.edu.ua.

Шелест Тетяна Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-6189>; e-mail: tetiana.shelest@khpi.edu.ua.

Shelest Tetiana – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Physics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-6189>; e-mail: tetiana.shelest@khpi.edu.ua.

Саприкін Ростислав Ігорович – аспірант кафедри мікро- та наноелектроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4539-5188>; e-mail: Rostyslav.Saprykin@infiz.khpi.edu.ua.

Saprykin Rostyslav – PhD student, Micro- and NanoElectronics Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4539-5188>; e-mail: Rostyslav.Saprykin@infiz.khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Хрипунов Г. С., Харченко М. М., Доброжан А. І., Хрипунов М. С., Шелест Т. М., Саприкін Р. І. Кристалічна структура базових шарів телуриду кадмію планарних елементів захисту НВЧ апаратури від електромагнітних імпульсів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 4 (22). С. 10-19. doi:10.20998/2413-4295.2024.04.02.

Please cite this article as:

Khrypunov G. S., Kharchenko M. M., Dobrozhan A. I., Khrypunov M. S., Shelest T. M., Saprykin R. I. Crystal structure of base layers of cadmium telluride of planar elements of protection of microwave equipment against electromagnetic pulses. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 4(22), pp. 10–19, doi:10.20998/2413-4295.2024.04.02.

Надійшла (received) 15.10.2024
Прийнята (accepted) 23.11.2024