

УДК 544.02; 621.793; 538.95

DOI 10.36910/775.24153966.2022.74.16

А.І. Кашуба¹, І.В. Семків¹, Г.А. Ільчук¹, Е.О. Височанська¹, В.М. Кордан², Р.Ю. Петрусь¹
 Національний університет «Львівська політехніка»¹
 Львівський національний університет імені Івана Франка²

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА ТА ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІКРИСТАЛІВ І ТОНКИХ ПЛІВОК $Cd_{1-x}Mn_xTe$

Представлено результати дослідження структурних властивостей, морфології поверхні і оптичних параметрів твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$, з концентрацією мангану $x=0.05$ та 0.45 . Синтез полікристалічних зразків проводився методом спрямованої кристалізації розплаву (вертикальний метод Бріджмена). Тверді розчини $Cd_{1-x}Mn_xTe$ кристалізуються в структурі цинкової обманки (структури тип – ZnS , просторова група $F-43m$ (№ 216)). Концентраційні співвідношення компонент досліджено методами рентгенівської дифракції і енергодисперсійного аналізу. Досліджено елементний розподіл на свіжому сколі твердого розчину $Cd_{1-x}Mn_xTe$. Синтезовані полікристалічні зразки було використано в якості шихти для осадження тонких плівок $Cd_{1-x}Mn_xTe$ методом квазізамкненого об'єму. Для обох шихт, з вмістом марганцю $x=0.05$ та 0.45 , було отримано близькі за композиційним складом тонкі плівки. На основі енергодисперсійного аналізу було виявлено, що вміст Mn становить ~ 0.03 (при вихідній шихті, з вмістом марганцю $x=0.05$). Зміна складу може бути викликана нерівноважністю процесу осадження плівок. Спектри оптичного пропускання (700–1000 нм) показали, що тонка плівка $Cd_{0.97}Mn_{0.03}Te$ характеризується значенням оптичної ширини забороненої зони ~ 1.45 eV. Також, було розраховано значення показника заломлення на основі емпіричних співвідношень.

Ключові слова: твердий розчин, тонка плівка, оптична ширина забороненої зони, пропускання, показник заломлення.

A.I. Kashuba, I.V. Semkiv, H.A. Ilchuk, E.O. Vysochanska, V.M. Kordan, R.Yu. Petrus

SYNTHESIS, STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF $Cd_{1-x}Mn_xTe$ POLYCRYSTALS AND THIN FILMS

The results of the study of structural properties, surface morphology, and optical parameters of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ solid state solutions with manganese concentrations $x=0.05$ and 0.45 are presented. The synthesis of polycrystalline samples was carried out by the method of directed crystallization of the melt (vertical Bridgman method). $Cd_{1-x}Mn_xTe$ solid state solutions were crystallized in the zinc blende structure (structure type – ZnS , space group $F-43m$ (No. 216)). Concentration ratios of the components were investigated by the methods of X-ray diffraction and energy-dispersive analysis. The elemental distribution on a fresh chip of a $Cd_{1-x}Mn_xTe$ solid solution was studied. The synthesized polycrystalline samples were used as a charge for the deposition of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ thin films by the closed space sublimation method. For both charges, with a manganese content of $x=0.05$ and 0.45 , thin films similar in composition were obtained. On the basis of energy-dispersive analysis, it was found that the Mn content is ~ 0.03 (at the initial charge, with a manganese content of $x=0.05$). The change in composition can be caused by the imbalance of the film deposition process. The optical transmission spectra (700–1000 nm) showed that the $Cd_{0.97}Mn_{0.03}Te$ thin film is characterized by an optical band gap of ~ 1.45 eV. Also, the value of the refractive index was calculated based on empirical ratios.

Keywords: solid state solution, thin film, optical band gap, transmittance, refractive index.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що обмежений ряд твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x \leq 0.77$) зі структурою типу сфалериту утворюються з бінарних фаз сполук CdTe і MnTe [1]. Механізм утворення твердого розчину $Cd_{1-x}Mn_xTe$ полягає у взаємному заміщенні атомів у підгратці металу ($Mn \leftrightarrow Cd$), тоді як мольна частка атомів у підгратці халькогену (Te) не змінюється. Як наслідок, властивості таких твердих розчинів є подібними до базових сполук з яких вони утворюються, в особливій мірі до кадмію телуриду CdTe, а їх фізичні характеристики набувають проміжних значень порівняно з бінарними сполуками CdTe та MnTe.

Дослідження спектральних залежностей коефіцієнта поглинання кристалів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ з $0 \leq x \leq 0.5$ показали, що край фундаментального оптичного поглинання зміщується в сторону вищих енергій в залежності від збільшення концентрації мангану [2]. А підвищення температури кристалу призводить до зміщення краю фундаментального оптичного поглинання в сторону нижчих енергій.

У публікації [3] повідомляється про отримання нових фотоперетворюючих структур на основі об'ємних кристалів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ і представлені результати дослідження фотоелектричних явищ в цих структурах. Зокрема, освітлення таких структур на основі $Cd_{1-x}Mn_xTe$ спричиняє появу фотовольтаїчного ефекту. Різка зростання fotocутливості починається при енергії фотонів $\hbar\omega \geq 0.9 - 1$ eV. Для структур з різним значенням x можна виділити широку смугу, максимум якої знаходиться в області $\hbar\omega \approx 1.3$ eV. Інтенсивність та ширина смуги зростає із збільшенням

концентрації марганцю. Це дозволяє зробити висновок, що концентрація марганцю в кристалах $Cd_{1-x}Mn_xTe$ впливає на ширину спектрального діапазону і фоточутливість нових структур.

Постановка проблеми. Практично усі дослідження твердого розчину $Cd_{1-x}Mn_xTe$, у літературних джерелах проведено на пластинках, одержаних сколюванням або вирізуванням із зливків, що вирощено із розплавів за високих температур. Проте технологія отримання однорідних тонких плівок $Cd_{1-x}Mn_xTe$ за температур значно нижчих від температури їх плавлення та специфіка їх фізичних властивостей все ще залишаються практично нез'ясованими. Зустрічаються поодинокі публікації отримання плівок методом молекулярно-променевої епітаксії [4–7], однак цей метод вимагає складних технологічних рішень, зокрема необхідно підтримувати в робочій камері надвисокий вакуум (порядку $\sim 10^{-8}$ Па), використання матеріалів джерел $Cd_{1-x}Mn_xTe$ надвисокої чистоти ($> 99.999\%$), та складність технічного обслуговування установки, що робить його малодоступним та дорогим. Одним із методів, який дозволяє отримувати однорідні тонкі плівки напівпровідникових матеріалів та їх твердих розчинів є метод квазізамкнутого об'єму (КЗО). В праці [8] було повідомлено про осадження тонких плівок на підкладки із слюди методом КЗО. Цей метод дозволяє одержувати полікристалічні плівки сполук в умовах, близьких до термодинамічної рівноваги, що є основною перевагою даного методу перед іншими вакуумними технологіями. Це забезпечує необхідні кристалографічні, електрофізичні властивості плівок. До переваг методу також варто віднести енерго- і матеріалозбереження, оскільки процес росту плівок $Cd_{1-x}Mn_xTe$ відбувається за температур, значно нижчих ніж температури плавлення відповідних сполук. Тому, вивчення впливу умов росту методом КЗО при знижених температурах випарника на структуру плівок $Cd_{1-x}Mn_xTe$ залишається актуальною задачею тонкоплівкової електроніки. Важливою перевагою росту плівок багатоконпонентних халькогенідів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ методом КЗО є високий тиск парів халькогеніду у процесі росту, що значно перевищує (на чотири порядки) тиск залишкових газів у робочому об'ємі. Це запобігає зменшенню неконтрольованого легування вирощених плівок із залишкової атмосфери робочої камери [9, 10].

Перелічені властивості $Cd_{1-x}Mn_xTe$ забезпечують актуальність подальших досліджень впливу технології отримання однорідних та варізонних твердих розчинів на їх фізичні властивості, а отримані результати є необхідними для подальших розробок оптоелектронних і магнітоелектричних приладів нового покоління.

Постановка завдань. Розробити спосіб осадження тонких плівок твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ з одночасним визначенням їх структурних, морфологічних і оптичних параметрів.

Методологія досліджень. Осадження тонких плівок $Cd_{1-x}Mn_xTe$ проводилось методом КЗО в умовах залишкового тиску газу $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Па. Установка, що була розроблена для вирощування тонких плівок $Cd_{1-x}Mn_xTe$, складається з високовакуумної системи безмасляної відкачки на основі магнітодіодного насоса фірми «Varian» (Італія), що забезпечує тиск залишкових газів у КЗО до $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Па. Дифузійний насос в установці використовується виключно для знегажування магнітодіодного насоса та підготовки його до роботи. В якості підкладок було використано скляні пластинки, які попередньо протравлювали в 30 % водному розчині HF. КЗО формується кварцовою ампулою у якій відбувається процес випаровування вихідних матеріалів, перенесення їх парів до підкладки та ріст плівок.

В якості шихти для осадження тонких плівок було використано тверді розчини $Cd_{1-x}Mn_xTe$ з вмісту компоненти Mn $x = 0.05$ та 0.45 , які синтезувались методом спрямованої кристалізації розплаву (вертикальний метод Бріджмена). Градієнт температури на фронті кристалізації становив 10-15 К/см, а швидкість росту – 2 мм/год. Сплави твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ одержували методом прямого сплавлення стехіометричних наважок вихідних компонент чистоти $> 99.9\%$. Для запобігання взаємодії розплаву зі стінками та зменшення числа початкових центрів кристалізації використовували кварцові ампули з відтягнутим у формі конуса дном та графітізованою внутрішньою поверхнею.

Процес вирощування плівок передбачав декілька етапів: на першому етапі проводили відкачування системи до високого вакууму з фоновим підігрівом (350-380 К) з метою знегажування ростової установки; на другому етапі забезпечувалась експозиція зони підкладки за більш високих температур, ніж зона джерела, впродовж 5-10 хв., з метою термічного травлення (передростового очищення) поверхні підкладки; на третьому етапі відбувався ріст плівки, що тривав 15–20 хв. (температура підкладки становила ~ 580 К, температура шихти – 780 К); на четвертому етапі відбувалось охолодження системи.

Товщину плівок вимірювали на профілометрі Veeco, модель Dektak 8. В результаті товщина осаджених плівок становила ~ 1.2 мкм.

Фазовий аналіз та уточнення кристалічної структури досліджували за даними рентгенівської дифракції (XRD) з використанням дифрактометра DRON-2.0M при кімнатній температурі з випромінюванням Fe K α ($\lambda = 1.936087$ Å).

Фазовий склад та поверхневий аналіз синтезованих сполук було проведено в центрі колективного користування науковим обладнанням «Лабораторія матеріалознавства інтерметалічних сполук» з використанням скануючого електронного мікроскопа (Tescan VEGA 3 LMU) та енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізатора (Oxford Instruments Aztec ONE з детектором X-MaxN20).

Спектральні залежності оптичного пропускання отриманих зразків вимірювали у видимій області (700-1000 нм) при кімнатній температурі за допомогою спектрометра AvaSpec-ULS2048-UA-50 (Avantes) [8].

Обговорення результатів. Кристалічна структура твердих розчинів заміщення Cd $_{1-x}$ Mn $_x$ Te ($x = 0.05$ та 0.45) була визначена на основі результатів XRD (рис. 1). З аналізу дифрактограм було встановлено, що синтезовані тверді розчини кристалізуються в структурі цинкової обманки (структури тип – ZnS, просторова група $F-43m$ (№ 216), параметрами елементарної комірки подано в таблиці 1). Жодних домішкових фаз (за допомогою XRD аналізу), що відповідають бінарним сполукам CdTe та/або MnTe не було виявлено.

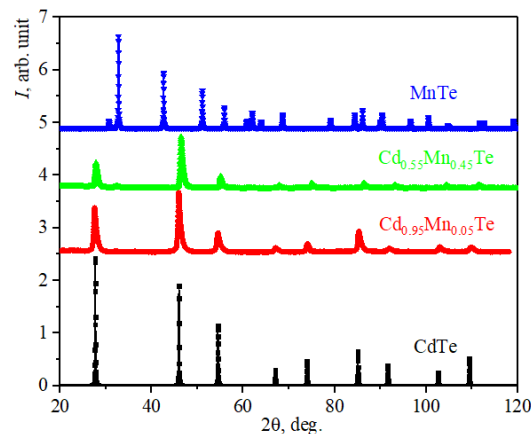


Рис. 1. XRD твердих розчинів Cd $_{1-x}$ Mn $_x$ Te ($x = 0-1$)

Вміст Mn можна оцінити за правилом Vegard та співвідношення (1).

$$a(x) = a(0) + \beta x$$

$$\beta = a(\text{MnTe}) - a(\text{CdTe})$$

(1)

$$x = \frac{a(x) - a(\text{CdTe})}{a(\text{MnTe}) - a(\text{CdTe})}$$

де $a(\text{MnTe}) = 5.7793$ Å, $a(\text{CdTe}) = 6.4875$ Å – параметр комірки кубічної модифікації фази MnTe та CdTe (просторова група $F-43m$). За даними рентгенівського аналізу було розраховано вміст Mn (в at.%) у зразках, який подано в таблиці 1.

Табл. 1.

Основні структурні параметри твердих розчинів Cd $_{1-x}$ Mn $_x$ Te при кімнатній температурі

Результати XRD аналізу				
Просторова група	$F-43m$			
Сполука	CdTe	Cd $_{0.95}$ Mn $_{0.05}$ Te	Cd $_{0.55}$ Mn $_{0.45}$ Te	MnTe
a , Å	6.4875	6.4647	6.4038	5.7793
$x(\text{Mn})$, at. %	0	3.2	12	1

Також, компонентний склад та його кількісне значення для твердих розчинів заміщення Cd $_{1-x}$ Mn $_x$ Te було встановлено на основі результатів енергодисперсійного аналізу (EDX, рис. 2 і таблицю 2). Результати досліджень XRD та EDX корелюють між собою і вказують на зменшення

вмісту Mn компоненти в порівнянні із завантаженою шихтою для синтезу твердих розчинів. Зміна складу може бути викликана нерівноважністю процесу синтезу [11].

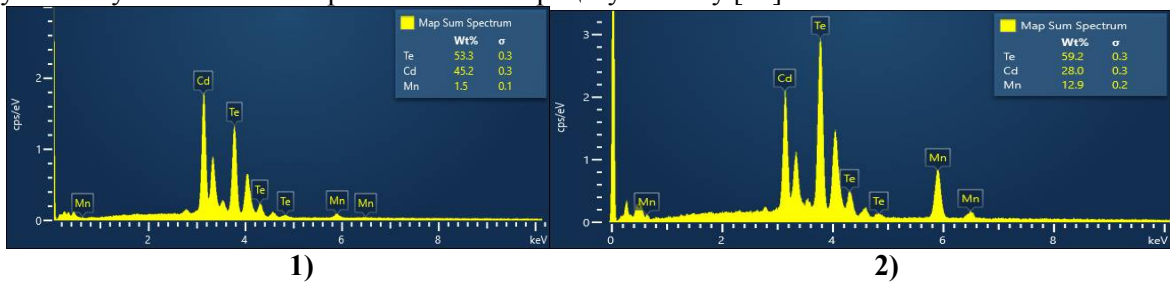


Рис. 2. Елементний склад твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (1 – $x=0.05$; 2 – $x=0.45$)

Табл. 2.

Результати EDX аналізу для твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$

Результати EDX аналізу			
Сполука	Компонента	Вміст, at. %	Вміст, wt. %
$Cd_{0.95}Mn_{0.05}Te$	Cd	47.45	44.7
	Mn	3.28	1.5
	Te	49.27	53.3
$Cd_{0.55}Mn_{0.45}Te$	Cd	26.28	27.0
	Mn	24.76	12.4
	Te	48.49	56.8

З метою встановлення компонентного розподілу та якості синтезованих сполук було проведено дослідження морфології свіжого сколу твердих розчинів заміщення $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (рис. 3).

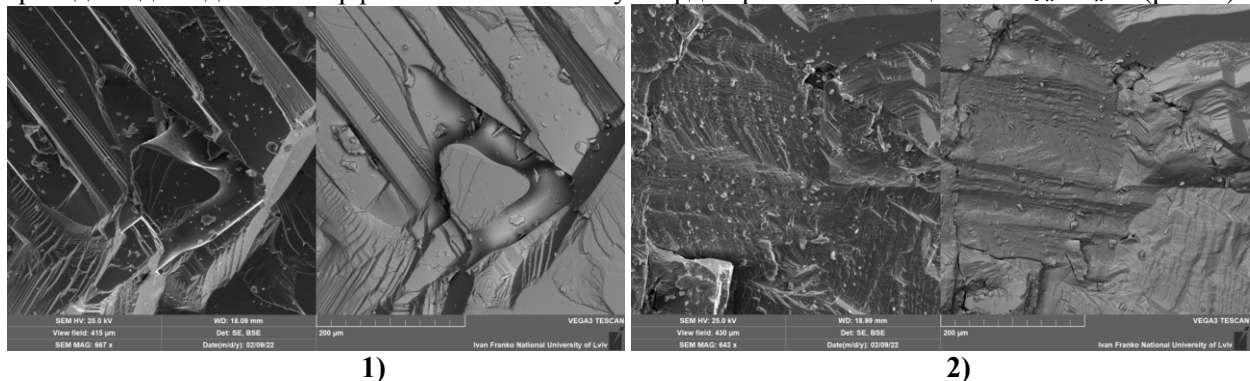


Рис. 3. Морфологія поверхні твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (1 – $x=0.05$; 2 – $x=0.45$)

За результатами аналізу поверхні було встановлено, що Mn компонента інкорпорується в CdTe без утворення кристалітів на поверхнях сколів. Розподіл компонент на поверхнях сколів є рівномірним та вказує на формування саме твердого розчину заміщення $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (рис. 4 і 5).

Вирощені полікристалічні зразки твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0.05$ і 0.45) було використано в якості шихти для осадження тонких плівок. В обох випадках було отримано дуже близькі за композиційним складом тонкі плівки. На основі EDX було виявлено, що вміст Mn становить ~ 0.03 . Вміст Mn в полікристалічній плівці є набагато нижчим, ніж заявлений в джерелі (див. деталі експерименту і обговорення вище). Аналогічна ситуація спостерігалась в роботі [11]. Зміна складу спостерігається при осадженні плівок $Cd_{1-x}Zn_xTe$ і викликана нерівноважністю процесу осадження плівок методом КЗО [8, 12].

Аналіз осаджених плівок проведено методом оптичної спектроскопії. Спектри пропускання $T(\lambda)$ плівок $Cd_{0.97}Mn_{0.03}Te$ (рис. 6) характеризуються яскраво вираженим краєм основного поглинання. Інтегральну величину пропускання плівки $Cd_{0.97}Mn_{0.03}Te$ розраховано з використанням наступного співвідношення:

$$(2)$$

де, – інтегральна величина пропускання в діапазоні $a-b$ (рис. 6). Отримане значення інтегральної величини пропускання становить 9.19 % ($a=700$ нм, $b=1000$ нм).

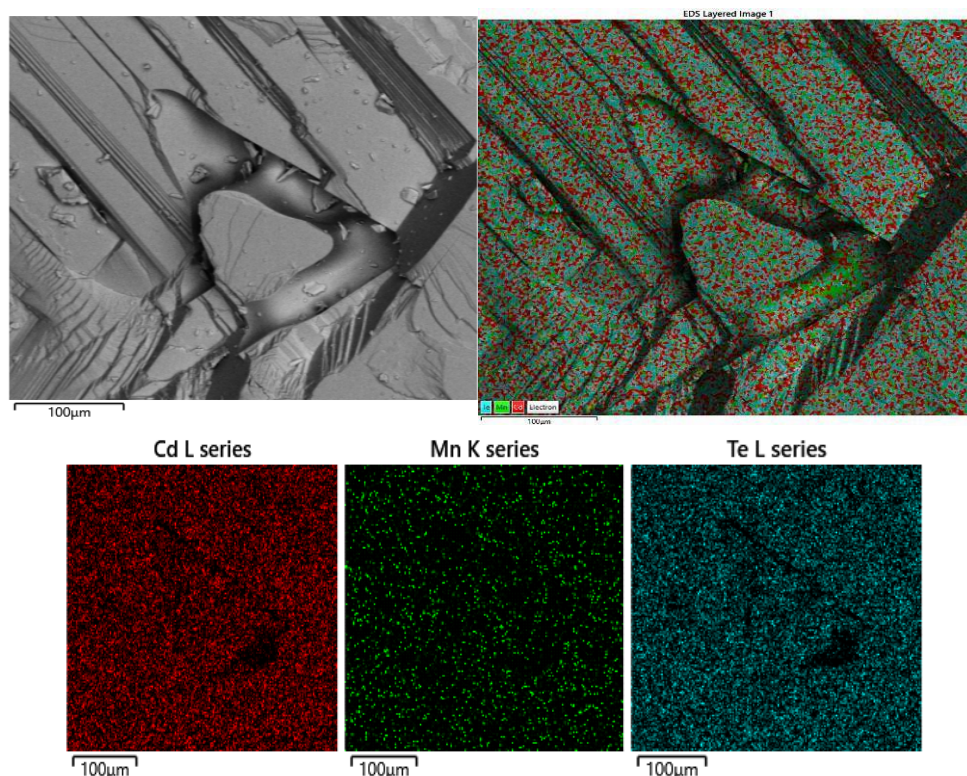


Рис. 4. Морфологія поверхні твердого розчину $\text{Cd}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{Te}$ з елементним розподілом

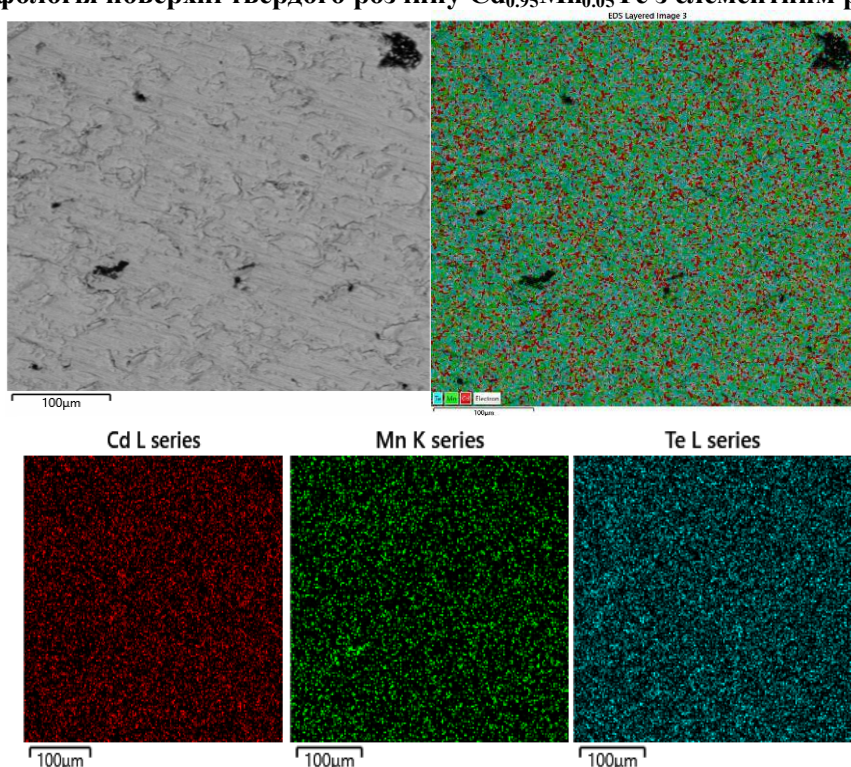


Рис. 5. Морфологія поверхні твердого розчину $\text{Cd}_{0.55}\text{Mn}_{0.45}\text{Te}$ з елементним розподілом

Для встановлення величини оптичної ширини забороненої зони було використано координати Тауца. З графіку залежності $(\alpha \cdot h\nu)^2$ від $h\nu$ (α – коефіцієнт поглинання, а $h\nu$ – енергія фотона) можна отримати значення оптичної ширини забороненої зони E_g шляхом екстраполяції лінійної частини ділянки на вісь енергії фотона (рис. 7). Значення оптичної ширини забороненої зони плівки $\text{Cd}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{Te}$ становить $E_g = 1.445$ eV. Для достовірності отриманого значення ширини оптичної забороненої зони було використано метод першої похідної спектральної залежності

спектру пропускання [13]. Отримане значення першого піку в даному методі становить ~855 нм (~1.45 eV), що добре узгоджується із значенням отриманим з використано координат Тауца.

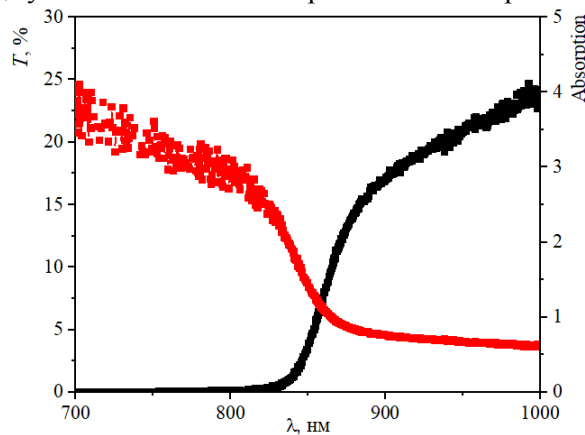


Рис. 6. Спектральна залежність оптичного пропускання і поглинання тонкої плівки твердого розчину $Cd_{0.97}Mn_{0.03}Te$

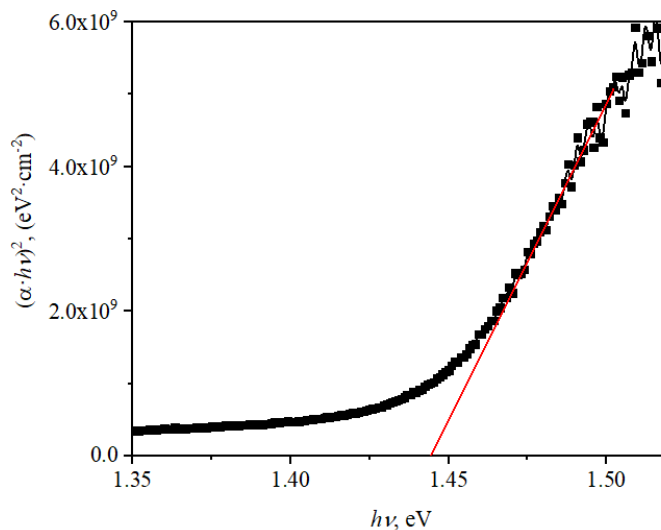


Рис. 7. Коефіцієнт поглинання α в координатах Тауца тонкої плівки твердого розчину $Cd_{0.97}Mn_{0.03}Te$.

Значення показника заломлення n тісно пов'язане з електронними властивостями та шириною забороненої зони. З використанням емпіричних рівнянь Tripathy [14], Moss [15], Ravindra [16] та Herve–Vandamme [17, 18] було розраховано показник заломлення (табл. 3). На основі значень n , розрахованих за різними співвідношеннями, також розраховано височастотну діелектричну константа ($\epsilon_{\infty} = n^2$, табл. 3). Відоме [19] експериментальне значення показника заломлення для твердого розчину $Cd_{0.930}Mn_{0.070}Te$ товщиною 2.460 мм становить 2.59 ± 3 . Порівняння експериментальних даних показника заломлення [19] з розрахованими на основі емпіричних рівнянь Tripathy, Moss, Ravindra та Herve–Vandamme вказує, що співвідношення Moss виявляє найбільшу збіжність.

Табл. 3.

Показник заломлення n і височастотна діелектрична константа ϵ_{∞} для тонкої плівки $Cd_{0.97}Mn_{0.03}Te$

Модель	Tripathy	Moss	Ravindra	Herve–Vandamme
n	3.24	2.85	3.19	2.94
ϵ_{∞}	10.5	8.12	10.18	8.64

Висновки.

Досліджено і встановлено структурні властивості, морфологію поверхні і оптичні параметри твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$, з концентрацією мангану $x = 0.05$ та 0.45 . Синтез полікристалічних зразків проводився вертикальним методом Бріджмена.

Тверді розчини $Cd_{1-x}Mn_xTe$ кристалізуються в структурі цинкової обманки. В досліджуваних зразках жодних домішкових фаз не було виявлено методом XRD. Параметри кристалічної ґратки показують тенденцію до зменшення із ростом вмісту мангану. Вміст Mn встановлено з використанням методів XRD і EDS. Результати досліджень XRD та EDX корелюють між собою і вказують на зменшення вмісту Mn компоненти в порівнянні із завантаженою шихтою для синтезу твердих розчинів. Результати аналізу поверхні показали, що Mn компонента інкорпорується в CdTe без утворення кристалітів на поверхнях сколів, а розподіл компонент є рівномірним, що вказує на формування саме твердого розчину заміщення.

Синтезовані полікристалічні зразки було використано в якості шихти для осадження тонких плівок $Cd_{1-x}Mn_xTe$ методом КЗО. На основі EDS було виявлено, що вміст Mn становить ~ 0.03 . Зміна складу може бути викликана нерівноважністю процесу осадження плівок.

Спектри пропускання $T(\lambda)$ плівок $Cd_{0.97}Mn_{0.03}Te$ характеризуються яскраво вираженим краєм основного поглинання. З використанням методу першої похідної та координат Гауца встановлено, що оптична ширина забороненої зони становить ~ 1.45 eV і характеризується прямими зонно-зонними оптичними переходами. Абсолютне значення коефіцієнта поглинання є близьким до величини в CdTe ($\sim 5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$), це дозволяє припустити, що тонкі плівки $Cd_{1-x}Mn_xTe$ можуть бути використані в якості поглинального шару сонячного фотоеlementa.

З використанням емпіричних рівнянь Tripathy, Moss, Ravindra та Herve–Vandamme було розраховано показник заломлення і високочастотну діелектричну константу. Порівняння з відомими експериментальними результатами показали, що співвідношення Moss виявляє найбільшу збіжність.

Список використаних джерел:

1. Triboulet R., Didier G. Growth and characterization of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ and MnTe crystals; contribution to the CdTe-MnTe pseudo-binary phase diagram determination. *J. Cryst. Growth*. 1981. Vol. 52, P. 614–618.
2. Furdyna J.K. Diluted magnetic semiconductors. *J. Appl. Phys.* 1988. Vol. 64, № 4, P. R29–R64.
3. Ильчук Г.А., Петрусь Р.Ю., Николаев Ю.А., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Теруков Е.И. Фоточувствительность поверхностно – барьерных и точечных структур на монокристаллах $Cd_xMn_{1-x}Te$. *ЖТФ*. 2008. Vol. 78, № 6, P. 49–53.
4. Waag A., Behr T., Litz T., Kuhn-Heinrich B., Hommel D., Landwehr G. RHEED studies of MBE growth mechanisms of CdTe and CdMnTe. *Mater. Sci. Eng. B*. 1993. Vol. 16, № 1–3, P. 103–107.
5. Bicknell R. N. Properties of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ -CdTe superlattices grown by molecular beam epitaxy. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.* 1985. Vol. 3, № 2, P. 709.
6. Yahia I.S., Yakuphanoglu F., Chusnutdinov S., Wojtowicz T., Karczewski G. Photovoltaic characterization of n -CdTe/ p -CdMnTe/GaAs diluted magnetic diode. *Curr. Appl. Phys.* 2013. Vol. 13, № 3, P. 537–543.
7. Nuriyev I.R., Mehrabova M.A., Nazarov A.M., Sadigov R.M. Growth of epitaxial $Cd_{1-x}Mn_xTe$ films. *Inorg. Mater.* 2016. Vol. 52, № 9, P. 886–889.
8. Ilchuk H., Zmiiovskaya E., Petrus R., Semkiv I., Lopatynskiy I., Kashuba A. Optical Properties of CdMnTe Film: Experimental and Theoretical Aspects. *Journal of nano- and electronic physics*. 2020. Vol. 12, № 1. 01027(4).
9. Il'chuk G.A., Kurilo I.V., Kus'nezh V.V., Petrus R.Y., Kogut I.T., Stan'ko T.N. Modeling and fabrication of three-dimensional silicon substrates with tailored shape and microtopography parameters for CdTe films. *Inorg. Mater.* 2013. Vol. 49, № 3, P. 239–246.
10. Il'chuk G.A., Kurilo I.V., Petrus R.Y., Kus'nezh V.V. Growth of CdTe films on Ni-coated microtextured silicon substrates. *Inorg. Mater.* 2014. Vol. 50, № 6, P. 559–565.
11. Lai J., Wang J., Wang L., Ji H., Xu R., Zhang J., Huang J., Shen Y., Min J., Wang L., Xia Y.. Characterization of CdMnTe films deposited from polycrystalline powder source using closed-space sublimation method. *J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surf. Films*. 2015. Vol. 33, № 5, P. 05E125.
12. Kosyak V., Opanasyuk A., Bukivskij P.M., Gnatenko Yu.P. Study of the structural and photoluminescence properties of CdTe polycrystalline films deposited by close-spaced vacuum sublimation. *J. Cryst. Growth*. 2010. Vol. 312, № 10, P. 1726–1730.

13. Delice S., Isik M., Gullu H.H., Terlemezoglu M., Bayrakli Surucu O., Parlak M., Gasanly N.M. Temperature dependence of band gaps in sputtered SnSe thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2019. Vol. 131, P. 22–26.
14. Tripathy S.K. Refractive indices of semiconductors from energy gaps. *Optical materials*. 2015. Vol. 46, P. 240.
15. Moss T. A Relationship between the Refractive Index and the Infra-Red Threshold of Sensitivity for Photoconductors. *Proc. Phys. Soc. B*. 1950. Vol. 63, № 3, P. 167.
16. Ravindra N.M., Auluck S., Srivastava V.K. On the Penn Gap in Semiconductors. *Phys. Stat. Sol. (B)*. 1979. Vol. 93, P. K155.
17. Herve P.J.L., Vandamme L.K.J. General relation between refractive index and energy gap in semiconductors. *Infrared Phys.* 1994. Vol. 35, № 4, P. 609–615.
18. Herve P.J.L., Vandamme L.K.J. Empirical temperature dependence of the refractive index of semiconductors. *J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 77, № 10, P. 5476.
19. Murray J.M., Wei J., Barnes J.O., Slagle J.E., Guha S. Measuring refractive index using the focal displacement method. *Applied optics*. 2014. Vol. 53, № 17, P. 3748–3752.