ISSN 1024-588X. Вісник Львівського університету. Серія фізична. 2021. Випуск 58. С. 3-15
Visnyk of the Lviv University. Series Physics. 2021. Issue 58. P. 3-15

УДК 539.231; 535-92; 538.975 https://doi.org/10.30970/vph.58.2021.3
PACS 42.25.Bs, 42.25.Gy, 63.20.-e

Осадження та оптична характеризація тонких плівок телуриду кадмію

С. Першина, А. Кашуба, І. Семків, Я. Сторожук, Г. Ільчук, Р. Петрусь

Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, 79013 Львів, Україна
e-mail: sofiia.pershyna.xt.2020@lpnu.ua

Подано результати досліджень оптичних властивостей тонкої плівки CdTe, осадженої на кварцову підкладку методом високочастотного магнетронного розпилення. Зокрема, проведено дослідження та аналіз спектрів оптичного пропускання і відбивання, а також спектрів комбінаційного розсіювання світла (КРС). Встановлено інтегральну величину оптичного пропускання та відбивання. З використанням експериментально встановленої спектральної залежності коефіцієнта пропускання визначено ширину забороненої зони, високочастотну та статичну діелектричну проникність, ефективну масу електрона та товщину плівки. Зокрема, ширину забороненої зони E_g визначено декількома методами: зі спектральної поведінки першої похідної оптичного пропускання ($\mathrm{d}T/\mathrm{d}\lambda$) та відбивання ($\mathrm{d}R/\mathrm{d}\lambda$); з залежності коефіцієнта оптичного поглинання згідно з класичною залежністю для прямозонних напівпровідників.

Ключові слова: тонка плівка, пропускання, відбивання, ширина забороненої зони.

1. Вступ

Телурид кадмію (CdTe) є напівпровідниковою сполукою групи II–VI і одним з найбільш придатних матеріалів для виготовлення тонкоплівкових сонячних елементів завдяки оптимальному значенню ширини забороненої зони (1,44 еВ) за кімнатної температури та високого коефіцієнту поглинання ($> 10^5$ см$^{-1}$) у видимому діапазоні [1–4]. Це один з найбільш перспективних матеріалів зі значним потенціалом, а надто в галузі сонячних батарей та оптоелектронних пристроїв, таких як γ- та рентгенівські детектори, світлодіоди (LED), польові транзистори (FET), лазери тощо. Сонячні елементи на основі CdTe (зокрема CdTe/CdS), безумовно, є ключовими структурами фотовольтаїки [5–7].

Проста стехіометрія та висока відтворюваність тонких плівок зменшують проблеми з неоднорідністю, які частіше трапляються у високоефективних тонкоплівкових сонячних елементах на основі інших сполук. Однак велике масове виробництво

© Першина С., Кашуба А., Семків І., Сторожук Я., Ільчук Г., Петрусь Р., 2021

кремнієвих (Si) пластин призвело до того, що виробничі витрати тонкоплівкових модулів на основі тонких плівок CdTe ставлять на один рівень із модулями Si.

Серед різних тонких плівок CdTe демонструє найвищу масштабованість та відтворюваність сьогодні і за останні 10 років. Високий коефіцієнт поглинання дозволяє виробляти високоефективні пристрої навіть із надтонкими поглинаючими шарами, отримані значення яких перевищують 10% при товщині менше 1 мкм [8,9] і приблизно рівні 10% лише при 0,5 мкм [10].

Тонкі плівки CdTe можна отримати різними методами, такими як імпульсне лазерне осадження, магнетронне напилення, електроосадження, розпилювальний піроліз, сублімація в просторі, осадження металевих органічних парів, термічне вакуумне випаровування тощо [2–8]. Проте поряд із значною кількістю інформації про фізичні властивості тонкоплівкового телуриду кадмію та різноманітністю методів осадження, актуальною є задача отримання якісних полікристалічних тонких плівок. Адже залежно від методу отримання, технологічних умов осадження, вибору типу підкладки та багатьох інших чинників залежать фундаментальні властивості осадженого тонкого шару CdTe [11].

Враховуючи наведену актуальність досліджень, метою цієї роботи є вивчення оптичних властивостей тонкої плівки CdTe, осадженої на кварцеву підкладку, методом високочастотного магнетронного напилення. Представлено результати дослідження оптичних спектрів пропускання, відбиття та комбінаційного розсіювання світла (КРС). Ширина забороненої зони, коефіцієнт заломлення, високочастотна діелектрична проникність, статична діелектрична проникність, ефективна електронна маса та товщина осадженої плівки визначалися на основі спектрів пропускання.

2. Методика експериментальних досліджень

2.1. Деталі осадження тонких плівок CdTe

Тонкі плівки CdTe осаджували на кварцові підкладки розміром $16\times8\times1{,}1$ мм^3 методом високочастотного магнетронного напилення (13,6 МГц) з використанням ВУП-5М (Selmi, Україна) [11]. Мішенню слугував монокристалічний диск 99.999% чистоти, товщиною 2 мм і діаметром 40 мм. Відстань від мішені до підкладки становила 75 мм, а час осадження – 20 хв. Початок і кінець процесу контролювалися за допомогою рухомого затвора. Перед процесом осадження камеру відкачували до тиску газу менше 4×10^{-4} Па.

Осадження плівок відбувалося при тиску аргону (Ar) 1,0–1,3 Па. Температура підкладки становила 489 К. Контроль температури здійснювали за допомогою ПІД-регулятора, який також контролював швидкість нагріву і охолодження, та забезпечував температурний режим осадження. Післяростовий відпал осаджених плівок, в цій роботі, не проводився [12].

2.2. Методика дослідження спектрів оптичного пропускання та відбивання

Спектральну залежність оптичного пропускання та відбиття отриманого зразка у видимій та близькій інфрачервоній областях (300–1500 нм) досліджували за кімнатної температури з використанням спектрофотометра Shimadzu UV-3600 (крок 0.5 нм). Прилад обладнаний подвійним монохроматором з дифракційними гратками, дейтерієвим та галогенним джерелом випромінювання, трьома детекторами: ФЕП R928 (УФ/видима область), фотодіоди InGaAs та PbS (ближня ІЧ область) [11, 12].

Для зняття спектрів пропускання спершу проведено вимірювання базового сигналу через чисту підкладку (100% пропускання оптичної системи приладу) без присутності взірців чи будь-яких перешкод. Після цього на одному з вікон оптичної системи встановлено пристосування із взірцем та проведено вимірювання пропускання в досліджуваному діапазоні довжин хвиль за нормального падіння світлових променів [11, 12].

Для зняття спектрів відбивання в оптичну систему приладу встановлено пристосування з двома дзеркалами, що мають коефіцієнт відбивання близький до 100%, і проведено вимірювання базового сигналу (100% відбивання оптичної системи приладу) в потрібному діапазоні довжин хвиль. Після цього на місце одного з дзеркал (опорне дзеркало залишається) встановлено досліджуваний взірець та проведено вимірювання спектру відбивання. В процесі вимірювань відбивання кут падіння променів був близький до нормального і становив $\alpha = 3^o$ [11, 12].

2.3. Методика дослідження спектрів КРС

Спектри КРС тонких плівок CdTe були зареєстровані методом мікрорамана (μ-Raman). Вимірювання проводили за кімнатної температури з використанням спектрометра T64000 Jobin-Yvon (Франція) налаштованого в геометрії зворотного розсіювання, обладнаного багатоканальною CCD камерою. Освітлена робоча область становила ∼1 мкм. Зразки збуджувалися Ar^{2+} лазером із довжиною хвилі випромінюванням 514,532 нм, та He-Ne лазером з $\lambda = 633$ нм. Потужність випромінювання регулювали послаблювальними фільтрами в межах від 1 до 250 мВт. Спектри реєстрували з часовими експозиціями від 5 до 120 с.

3. Результати вимірювань та обговорення

3.1. Аналіз спектрів оптичного пропускання та відбиття

На рисунку 1 та 2 показано спектр пропускання та відбивання системи CdTe/кварц, відповідно. Коефіцієнт пропускання та відбивання сильно залежить від структури плівки, яка визначається методом отримання, товщиною плівки та умовами осадження. Спектри оптичного пропускання і відбиття тонких плівок демонструють періодичні максимуми і мінімуми в області "прозорості", які пов'язані з інтерференцією, що вказує на високу структурну досконалість тонких плівок. У разі недосконалої поверхні інтерференційна картина не простежується з огляду на значне розсіяння та дифузне відбиття [13].

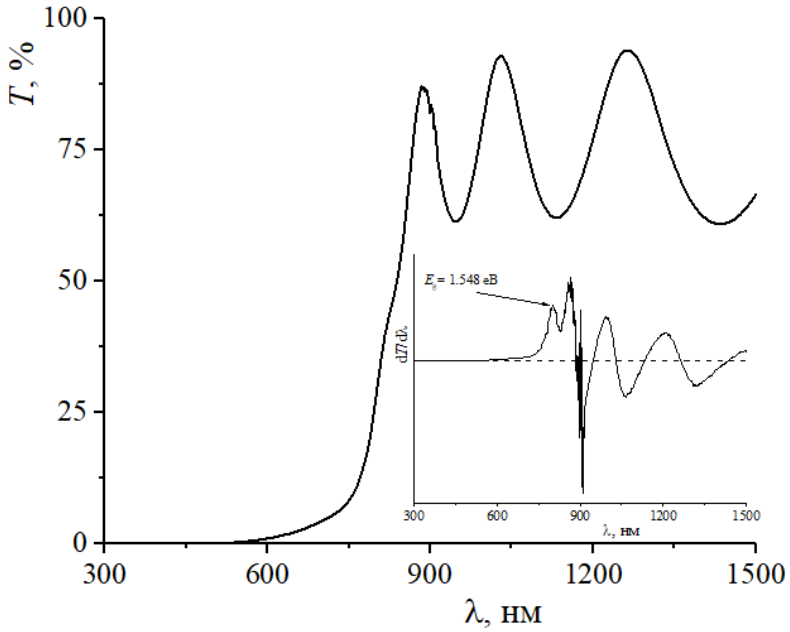

Рис. 1: Спектри оптичного пропускання плівки CdTe. Вставка: перша похідна спектрів пропускання $\mathrm{d}T/\mathrm{d}\lambda$

Інтегральну величину коефіцієнта пропускання та відбивання встановлено з використанням співвідношення (1), де $\overline{T}$, $\overline{R}$ – інтегральна величина пропускання та відбивання в діапазоні довжин хвиль b-a (a = 300 нм, b = 1500 нм), відповідно. Отримане значення інтегральної величини пропускання становить 43,14%, а відбивання – 19,27%.

$$\overline{T} = \frac{1}{b\text{-}a}\int_a^b T d\lambda, \overline{R} = \frac{1}{b\text{-}a}\int_a^b R d\lambda. \tag{1}$$

За результатами спектральної залежності коефіцієнта пропускання можна встановити товщину плівки [11–13]. Для визначення товщини використано співвідношення (2). В рівнянні (2) λ_1 і λ_2 – довжини хвиль, що відповідають сусіднім крайнім точкам спектра пропускання, а M = 1 для двох сусідніх екстремумів одного типу (max–max, min–min) і M = 0.5 для двох сусідніх екстремумів протилежних типів (max–min, min–max). Як наслідок за спектрами оптичного пропускання встановлено, що товщина плівки становить 717,7 нм,

$$d = \frac{M\lambda_1\lambda_2}{2(n(\lambda_1)\lambda_2 - n(\lambda_2)\lambda_1)}. \tag{2}$$

Оптична ширина забороненої зони, відома як мінімальна енергія фотона, необхідна для збудження електрона у напівпровідниковому матеріалі, може бути визна-

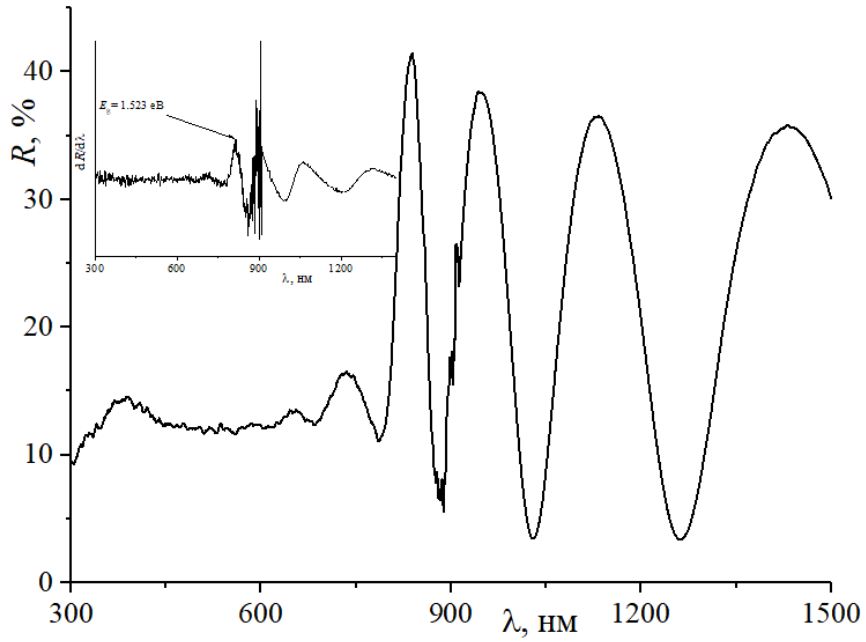

Рис. 2: Спектри оптичного відбиття плівки CdTe. Вставка: перша похідна спектрів відбивання $\mathrm{d}R/\mathrm{d}\lambda$

чена зі спектра пропускання та відбиття. Для визначення оптичної ширини забороненої зони плівки CdTe використано координати Тауца. Побудувавши залежність $(\alpha{\cdot}\mathrm{h}\nu)^2$ від $\mathrm{h}\nu$ з використанням екстраполяції лінійної частини ділянки до осі енергій, можна отримати величину оптичної ширини забороненої зони (див. рис. 3). В результаті, отримано величину 1,525 еВ, що відповідає сполуці CdTe [11]. Слід зауважити, що лінійна поведінка залежностей $(\alpha{\cdot}\mathrm{h}\nu)^2 = f(\mathrm{h}\nu)$ в інтервалі енергій від 1,55 до 1,67 еВ свідчить про утворення краю фундаментального поглинання прямими міжзонними оптичними переходами.

Окрім того, оптичну ширину забороненої зони визначали з положення максимального піку на спектральній залежності першої похідної коефіцієнта пропускання $\mathrm{d}T/\mathrm{d}\lambda$ та відбиття $\mathrm{d}R/\mathrm{d}\lambda$ (див. вставку на рис. 1 та 2, відповідно). Положення максимуму відповідає ширині забороненої зони E_g і визначається з результатів його Гаусової апроксимації. Отримана даним способом оптична ширина забороненої зони становить 1.548 та 1,523 еВ, відповідно. Можемо простежувати незначну розбіжність (0,023 еВ) із попереднім способом (визначення оптичної ширини забороненої зони з використанням координат Тауца), що є притаманним для цих методів обчислення [14].

Одним з основних оптичних пареметрів матеріалу є його показник заломлення. З літератури відомо [15–18] ряд емпіричних співвідношень, що дозволяють отримати значення показника заломлення матеріалу, використовуючи значення ширини забороненої зони. Наприклад, найпоширенішими з них є співвідношення запропоно-

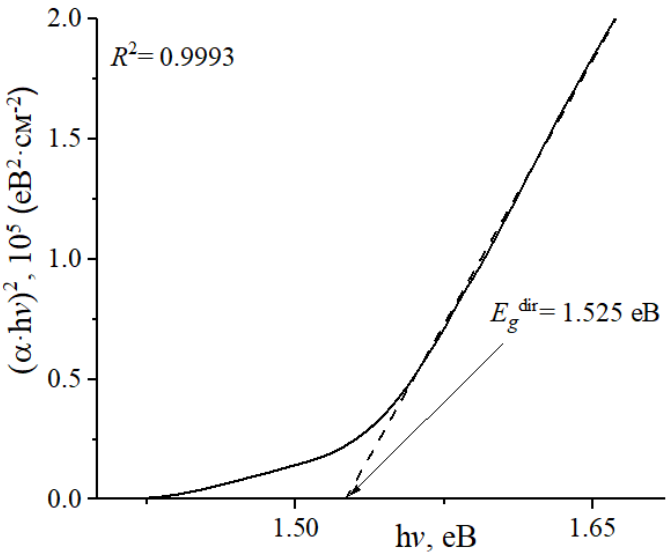

Рис. 3: Спектральна залежність оптичного поглинання в координатах Тауца тонкої плівки CdTe

вані Моссом (Moss, n_M), Равіндрою (Ravindra, n_R), Херве та Вандамме (Herve and Vandamme, n_{HV}) і Трipахі (Tripathy, n_T). Відповідно до запропонованих моделей, показник заломлення напівпровідника (із зазором, що знаходиться в межах $0 < E_g < 5$ еВ) можна обчислити, використавши співвідношення (3):

$$n_M^4 E_g = C, n_R = a - bE_g, n_{HV}^2 = 1 + [A/(E_g + B)]^2, n_T = n_0[1 + \alpha \exp(-\beta E_g)]. \quad (3)$$

У рівняннях (3): C= 95 еВ, a= 4,084 еВ, b= 0,62 еВ$^{-1}$, A= 13,6 еВ, B= 3,47 еВ, n_0= 1,73, α= 1,9017 та β= 0,539 еВ$^{-1}$.

Використовуючи різні моделі, задані рівняннями (3), було проведено розрахунок значення показника заломлення для тонкої плівки CdTe (див. табл. 1). Відоме [19] значення показника заломлення CdTe становить 2,6820 для λ= 600 нм, T= 300 К. Порівнюючи отримані результати в цій роботі з літературними відомостями, можна припустити, що співвідношення Мосса найбільш точно дозволяє встановити значення показника заломлення порівняно з іншими розглянутими моделями.

На основі отриманих значень показника заломлення було розраховано високочастотну діелектричну проникність ($\varepsilon_\infty = n^2$). Отримані значення ε_∞ представлено в таблиці 1.

Статичну діелектричну проникність (ε_0) тонкої плівки CdTe розраховували за допомогою співвідношення використаного у [20], що виражає залежність ε_0 від ширини забороненої зони для напівпровідникових сполук у вигляді співвідношення (4):

$$\varepsilon_0 = -33,26876 + 78,61805E_g - 45,70795E_g^2 + 8,32449E_g^3. \quad (4)$$

Відомі [20] значення високочастотної діелектричної проникності та статичної діелектричної проникності становлять 7,15(5) та 10,3(1), відповідно. Порівнюючи отримані результати в цій роботі (див. табл. 1) з літературними відомостями, можна припустити, що відношення Мосса найбільш точно дозволяє встановити значення високочастотної діелектричної проникності. Проте встановлене значення статичної діелектричної проникності з використанням рівняння (4) показує незначне заниження отриманого значення порівняно з літературними відомостями.

Подібно до статичної діелектричної проникності, відомим з [20] є співвідношення (5) між ефективною масою електрона (m_e) та шириною забороненої зони (E_g) для напівпровідникових сполук. У рівнянні (5): m_0 – маса спокою електрона.

$$\frac{m_e}{m_0} = 5,17004 - 7,46699E_g + 3,63286E_g^2 - 0,57525E_g^3. \quad (5)$$

Відоме [20] значення ефективної маси електрона становить $0{,}1\,m_0$. Використання рівняння (5) для отримання значення ефективної маси електрона показує завищення значення удвічі порівняно з літературними відомостями.

Табл. 1: Оптичні параметри тонкої плівки CdTe, отримані з результатів експериментальних досліджень спектрів пропускання та відбиття

Параметр	$\mathrm{d}T/\mathrm{d}\lambda$	$\mathrm{d}R/\mathrm{d}\lambda$	$(\alpha{\cdot}\mathrm{h}\nu)^2 = f(\mathrm{h}\nu)$
E_g, eB	1.548	1.523	1.525
ε_0	9.78136	9.85306	9.84767
$\frac{m_e}{m_0}$	0.1827	0.19219	0.19138

Парам.	Метод визн. E_g	Moss	Ravindra	Herve and Vandamme	Tripathy
n	$\mathrm{d}T/\mathrm{d}\lambda$	2.79891	3.12424	2.88884	3.15832
	$\mathrm{d}R/\mathrm{d}\lambda$	2.81032	3.13974	2.90158	3.17769
	$(\alpha{\cdot}\mathrm{h}\nu)^2 = f(\mathrm{h}\nu)$	2.8094	3.1385	2.90055	3.17614
ε_∞	$\mathrm{d}T/\mathrm{d}\lambda$	7.83387	9.76088	8.34542	9.97497
	$\mathrm{d}R/\mathrm{d}\lambda$	7.8979	9.85797	8.41916	10.09775
	$(\alpha{\cdot}\mathrm{h}\nu)^2 = f(\mathrm{h}\nu)$	7.89272	9.85018	8.41322	10.087834

3.2. Аналіз спектрів КРС

Табл. 2: Характеристики піків у спектрі КРС

Положення піку, $\mathrm{см}^{-1}$	121	139	142	167	331
Фононна мода	A	TO	E	1LO	2LO
Сполука	Te	CdTe	Te	CdTe	CdTe

На спектрах КРС можна розрізнити чотири фононні моди (див. рис. 4 та 5). Збудження лазером з довжиною хвилі 633 нм близькою до ширини забороненої зо-

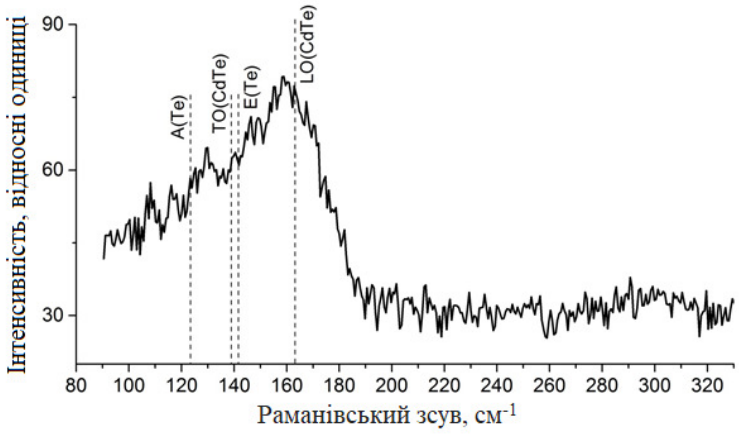

Рис. 4: Спектр КРС зсуву плівки CdTe. Збудженні $\lambda = 514{,}532$ нм, потужність 1 мВт, час експозиції 60 с

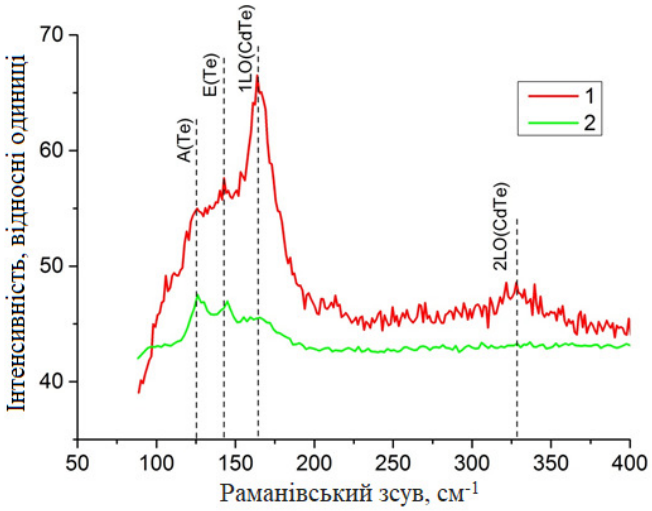

Рис. 5: Спектр КРС зсуву плівки CdTe. Збудження $\lambda = 633$ нм (1), $\lambda = 514$ нм (2), потужність 3 мВт, час експозиції 30 с

ни плівок CdTe приводить до виникнення коливних мод TO (Cd-Te), 1LO (Cd-Te) та 1LO (Cd-Te) з частотою 139, 167 та 331 $см^{-1}$, відповідно (див. табл. 2). Телурові моди A (Te-Te) і E (Te-Te) найчіткіше простежуються на фоні мод Cd-Te під час збудження зеленим світлом, що призводить до нагрівання зразка (див. криву 2 на рис. 5). Кристалічний телур має раманівські піки з частотою 90 (E мода), 121 (A мода) і 142 (E мода) $см^{-1}$ та в $\sim$75 раз [21] більший переріз раманівського розсію-

вання порівняно з телуридом кадмію (за однакових умов збудження). Присутність моди A (Te-Te) є індикатором включень Te у полікристалічній плівці CdTe. Форма включень (у вигляді кластерів чи тонкої плівки), їх можливе розташування (на поверхні або в об'ємі плівок CdTe) є нез'ясованими.

Висновки

Тонкі плівки CdTe осаджували на кварцові підкладки методом високочастотного магнетронного осадження. Положення краю фундаментального поглинання в спектрі пропускання відповідає значенню типовому для сполуки CdTe. Товщина плівки $d = 717{,}7$ нм була отримана з аналізу інтерференційних екстремумів у спектрі пропускання $T(\lambda)$. Значення оптичної ширини забороненої зони E_g визначали різними методами. Отримані значення становлять від 1,523 до 1,548 еВ залежно від методу визначення.

На основі отриманих експериментальних значень оптичної ширини забороненої зони розраховано показник заломлення, високочастотну діелектричну проникність, статичну діелектричну проникність та ефективну електронну масу. Встановлено, що співвідношення Мосса найбільш точно дозволяє визначити значення показника заломлення та високочастотної діелектричної проникності.

Спектри КРС демонструють коливні смуги 139, 167 та 331 $см^{-1}$, що підтверджує утворення сполуки CdTe. Також було виявлено смуги 90 і 121 $см^{-1}$, які відповідають коливанням кристалічного телуру. Форма включень та можливе розташування кристалічного телуру має бути предметом подальших досліджень.

Подяка

Робота виконана в межах проєкту No. 0121U108649 Міністерства освіти і науки України.

---

1. Spalatu N. Properties of the $CdCl_2$ Air-annealed CSS CdTe Thin Films / N. Spalatu, J. Hiie, V. Valdna, M. Caraman, N. Maticiuc, V. Mikli, T. Patlog, M. Krunks, V. Lughi // Energy Proce.– 2014.– Vol. 44.– P. 85–95. Doi:10.1016/j.egypro.2013.12.013.
2. Toma O. Optical, Morphological and Electrical Studies of Thermally Vacuum Evaporated CdTe Thin Films for Photovoltaic Applications / O. Toma, L. Ion, M. Girtan, S. Antohe // Sol. Energy.– 2014.– Vol. 108.– P. 51–60. Doi:10.1016/j.solener.2014.06.031.
3. Ban I. Preparation of Cadmium Telluride Nanoparticles from Aqueous Solutions by Sonochemical Method / I. Ban, M. Kristl, V. Danc, A. Danc, M. Drofenik // Mater. Lett.– 2012.– Vol. 67.– P. 56–59. Doi:10.1007/s40820-017-0137-5.
4. Moure-Flores de F. CdTe Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition Using Powder as Target: Effect of Substrate Temperature / F. de Moure-Flores,

J. G. Quinones-Galvan, A. Guillen-Cervantes, J. S. Arias-Ceron, A. Hernandez-Hernandez, J. Santoyo-Salazar, J. Santos-Cruz, S. A. Mayen-Hernandez, M. de la L. Olvera, J. G. Mendoza-Alvarez, M. Melendez-Lira, G. Contreras-Puente // J. Crys. Growth.– 2014.– Vol. 386.– P. 27–31. Doi:10.1016/j.jcrysgro.2013.09.036.

5. Gunjal S. D. Spray Pyrolysis Deposition of p-CdTe Films: Structural, Optical and Electrical Properties / S. D. Gunjal, Y. B. Khollam, S. R. Jadkar, T. Shripathi, V. G. Sathe, P. N. Shelke, M. G. Takwale, K. C. Mohite // Sol. Energy.– 2014.– Vol. 106.– P. 56–62. Doi:10.1016/j.solener.2013.11.029.
6. Pandey S. K. Growth of Cubic and Hexagonal CdTe Thin Films by Pulsed Laser Deposition / S. K. Pandey, U. Tiwari, R. Raman, C. Prakash, V. Karishna, V. Dutta, K. Zimik // Thin Solid Films.– 2005.– Vol. 473.– P. 54–57. Doi:10.1016/j.tsf.2004.06.157.
7. Romeo A. Influence of CdS Growth Process on Structural and Photovoltaic Properties of CdTe/CdS Solar Cells / A. Romeo, D. L. Batzner, H. Zogg, C. Vignali, A. N. Tiwari // Sol. Energy Mater. Sol. Cells.– 2001.– Vol. 67.– P. 311–321. Doi:10.1016/S0927-0248(00)00297-X.
8. Paudel N. R. Ultrathin CdS/CdTe Solar Cells by Sputtering / N. R. Paudel, K. A. Wieland, A. D. Compaan // Sol. Energy Mater. Sol. Cells.– 2012.– Vol. 105.– P. 109–112. Doi:10.1016/j.solmat.2012.05.035.
9. Paudel N. R. Ultrathin CdTe Solar Cells with MoO_{3-x}/Au Back Contacts / N. R. Paudel, A. D. Compaan, Y. Yan // J. Electron. Mater.– 2014.– Vol. 43.– P. 2783–2787. Doi:10.1007/s11664-014-3042-4.
10. Plotnikov V. V. 10% Efficiency Solar Cells with 0.5 μm of CdTe / V. V. Plotnikov, D. Kwon, K. A. Wieland, A. D. Compaan // 34th IEEE Photovolt. Spec. Conf.– 2009.– Vol. 34.– P. 1435–1438. Doi:10.1109/PVSC.2009.5411312.
11. Petrus R. Optical Properties of CdTe Thin Films Obtained by the Method of High-Frequency Magnetron Sputtering / R. Petrus, H. Ilchuk, A. Kashuba, I. Semkiv, E. Zmiiovska // Functional Materials.– 2020.– Vol. 27.– P. 342–347. Doi:10.15407/fm27.02.342.
12. Ільчук Г. Оптичні властивості тонких плівок CdSe, відпалених в атмосфері $CdCl_2$ / Г. Ільчук, А. Кашуба, Р. Петрусь, І. Семків, В. Гайдучок // Журнал фізичних досліджень.– 2020.– Вип. 24.– С. 3705(1–9). Doi:10.30970/jps.24.3705.
13. Ilchuk H. Optical-Energy Properties of CdSe Thin Film / H. Ilchuk, R. Petrus, A. Kashuba, I. Semkiv, E. Zmiiovska // Molecular Crystals and Liquid Crystals.– 2020.– Vol. 699.– P. 1–8. Doi:10.1080/15421406.2020.1732532.
14. Cortes A. Grain Size Dependence of the Bandgap in Chemical Bath Deposited CdS Thin Films / A. Cortes, H. Gomes, R. E. Marotti, G. Riveros, E. A. Dalchiele // Sol. Energy Mater. Sol. Cells.– 2004.– Vol. 82.– P. 21–34. Doi:10.1016/j.solmat.2004.01.002.
15. Moss T. A. Relationship Between the Refractive Index and the Infra-Red Threshold of Sensitivity for Photoconductors / T. A. Moss // Proceedings of the Physical Society. Section B.– 1950.– Vol. 63.– P. 167–176. Doi:10.1088/0370-1301/63/3/302.
16. Ravindra N. M. On the Penn Gap in Semiconductors / N. M. Ravindra, S. Auluck, V. K. Srivastava // Physica status solidi (b).– 1979.– Vol. 93.– P. K155–K160. Doi:10.1002/pssb.222093025710.1002/pssb.2220930257.
17. Herve P. J. L. Empirical Temperature Dependence of the Refractive Index of Semi-

conductors / P. J. L. Herve, L. K. J. Vandamme // Journal of Applied Physics.– 1995.– Vol. 77.– P. 5476–5477. Doi:10.1063/1.359248.

18. Tripathy S. K. Refractive Indices of Semiconductors from Energy Gaps / S. K. Tripathy // Optical Materials.– 2015.– Vol. 46.– P. 240–246. Doi:10.1016/j.optmat.2015.04.026.
19. De Bell A. G. Cryogenic Refractive Indices and Temperature Coefficients of Cadmium Telluride from 6 μm to 22 μm / A. G. De Bell, E. L. Dereniak, J. Harvey, J. Nissley, J. Palmer, A. Selvarajan, W. L. Wolfe // Applied Optics.– 1979.– Vol. 18.– P. 3114–3115. Doi:10.1364/AO.18.003114.
20. Strauss A. J. The Physical Properties of Cadmium Telluride / A. J. Strauss // Revue de Physique Appliquee.– 1977.– Vol. 12.– P. 167–184. Doi:10.1051/rphysap:01977001202016700.
21. Morell G. Raman Spectroscopy of Oxygenated Amorphous CdTe Films / G.Morell, A.Reynes-Figueroa, R.S.Katiyar, M.H.Farias, F.J.Espinoza-Beltran, O.Zelaya-Angel, F.Sanchez-Sinencio // Journal of Raman spectroscopy.– 1994.– Vol. 25.– P. 203–207. Doi:10.1002/jrs.1250250303.

References

1. N. Spalatu, J. Hiie, V. Valdna, M. Caraman, N. Maticiuc, V. Mikli, T. Patlog, M. Krunks, V. Lughi, Energy Proce. **44**, 85–95 (2014). Doi:10.1016/j.egypro.2013.12.013.
2. O. Toma, L. Ion, M. Girtan, S. Antohe, Sol. Energy. **108**, 51–60 (2014). Doi:10.1016/j.solener.2014.06.031.
3. I. Ban, M. Kristl, V. Danc, A. Danc, M. Drofenik, Mater. Lett. **67**, 56–59 (2012). Doi:10.1007/s40820-017-0137-5.
4. F. de Moure-Flores, J. G. Quinones-Galvan, A. Guillen-Cervantes, J. S. Arias-Ceron, A. Hernandez-Hernandez, J. Santoyo-Salazar, J. Santos-Cruz, S. A. Mayen-Hernandez, M. de la L. Olvera, J. G. Mendoza-Alvarez, M. Melendez-Lira, G. Contreras-Puente, J. Crys. Growth. **386**, 27–31 (2014). Doi:10.1016/j.jcrysgro.2013.09.036.
5. S. D. Gunjal, Y. B. Khollam, S. R. Jadkar, T. Shripathi, V. G. Sathe, P. N. Shelke, M. G. Takwale, K. C. Mohite, Sol. Energy. **106**, 56–62 (2014). Doi:10.1016/j.solener.2013.11.029.
6. S. K. Pandey, U. Tiwari, R. Raman, C. Prakash, V. Karishna, V. Dutta, K. Zimik, Thin Solid Films. **473**, 54–57 (2005). Doi:10.1016/j.tsf.2004.06.157.
7. A. Romeo, D. L. Batzner, H. Zogg, C. Vignali, A. N. Tiwari, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **67**, 311–321 (2001). Doi:10.1016/S0927-0248(00)00297-X.
8. N. R. Paudel, K. A. Wieland, A. D. Compaan, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **105**, 109–112 (2012). Doi:10.1016/j.solmat.2012.05.035.
9. N. R. Paudel, A. D. Compaan, Y. Yan, J. Electron. Mater. **43**, 2783–2787 (2014). Doi:10.1007/s11664-014-3042-4.
10. V. V. Plotnikov, D. Kwon, K. A. Wieland, A. D. Compaan, 34th IEEE Photovolt. Spec. Conf. **34**, 1435–1438 (2009). Doi:10.1109/PVSC.2009.5411312.

11. R. Petrus, H. Ilchuk, A. Kashuba, I. Semkiv, E. Zmiiovska, Functional Materials. **27**, 342–347 (2020). Doi:10.15407/fm27.02.342.
12. H. Ilchuk, A. Kashuba, R. Petrus, I. Semkiv, V. Haiduchok // Journal of Physical Studies. **24**, 3705(1–9) (2020). Doi:10.30970/jps.24.3705.
13. H. Ilchuk, R. Petrus, A. Kashuba, I. Semkiv, E. Zmiiovska, Molecular Crystals and Liquid Crystals. **699**, 1–8 (2020). Doi:10.1080/15421406.2020.1732532.
14. A. Cortes, H. Gomes, R. E. Marotti, G. Riveros, E. A. Dalchiele, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **82**, 21–34 (2004). Doi:10.1016/j.solmat.2004.01.002.
15. T. A. Moss, Proceedings of the Physical Society. Section B. **63**, 167–176 (1950). Doi:10.1088/0370-1301/63/3/302.
16. N. M. Ravindra, S. Auluck, V. K. Srivastava, Physica status solidi (b). **93**, K155–K160 (1979). Doi:10.1002/pssb.222093025710.1002/pssb.2220930257.
17. P. J. L. Herve, L. K. J. Vandamme, Journal of Applied Physics. **77**, 5476–5477 (1995). Doi:10.1063/1.359248.
18. S. K. Tripathy, Optical Materials. **46**, 240–246 (2015). Doi:10.1016/j.optmat.2015.04.026.
19. A. G. De Bell, E. L. Dereniak, J. Harvey, J. Nissley, J. Palmer, A. Selvarajan, W. L. Wolfe, Applied Optics. **18**, 3114–3115 (1979). Doi:10.1364/AO.18.003114.
20. A. J. Strauss, Revue de Physique Appliquee. **12**, 167–184 (1977). Doi:10.1051/rphysap:01977001202016700.
21. G.Morell, A.Reynes-Figueroa, R.S.Katiyar, M.H.Farias, F.J.Espinoza-Beltran, O.Zelaya-Angel, F.Sanchez-Sinencio, Journal of Raman spectroscopy. **25**, 203–207 (1994). Doi:10.1002/jrs.1250250303.

Статтю отримано: 15.04.2021
Прийнято до друку: 11.05.2021

Deposition and optical characterization of the cadmium telluride thin films

S. Pershyna, A. Kashuba, I. Semkiv, Ya. Storozhuk, H. Ilchuk, R. Petrus

Lviv Polytechnic National University
S. Bandera St., 12, 79013 Lviv, Ukraine
e-mail: sofiia.pershyna.xt.2020@lpnu.ua

The optical properties of CdTe thin film prepared by high-frequency magnetron sputtering method are determined. The optical transmission, reflectivity and μ-Raman spectra of the CdTe thin film have been determined. The film thickness of d= 717.7 nm was obtained by optical interference analysis of the transmittance spectra $T(\lambda)$ of CdTe films. The fundamental absorption edge position in the transmittance spectrum of studied thin films corresponds to the values that are typical for CdTe compound. The spectral dependence of the optical absorption of CdTe thin film in the $(\alpha{\cdot}h\nu)^2$ vs. $h\nu$ coordinates demonstrates the presence of the fundamental absorption edge and the band gap is of a direct type. The value of optical band gap E_g for CdTe was obtained by different methods (from optical transmission and reflectivity spectra) and identified between 1.523 and 1.548 eV. Based on the obtained experimental data of band gap, the refractive index, static dielectric constant and electron effective mass were calculated. Obtained values of electron effective mass and static dielectric constant show small underestimation if compare with experimental results. Based on the values of n calculated from the different relations, we also calculated the high-frequency dielectric constant. It is established that the Moss relation allows to determine the value of the refractive index and high-frequency dielectric constant in the most accurate way. Raman spectra show modes at 139, 167 and 331 cm^{-1} which confirm the formation of the of CdTe compound. Also, we observed peaks at 90 and 121 cm^{-1} which are corresponding to crystalline tellurium. The form of the inclusions and their possible location of crystalline tellurium must be subject of future studies.

Key words: thin film, transmission, reflection, band gap.