

SENSOR MATERIALS

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

PACS number(s): 73.20.Hb, 73.25.+i

УДК 621.315.592

СТРУКТУРА І ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК CdTe, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ

Г. С. Хрипунов, Г. І. Копач, М. М. Харченко, А. І. Доброжан

Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»,
НТУ «ХПІ» Україна, м. Харків, вул. Кирпичова (Фрунзе), 21
gkopach@ukr.net

СТРУКТУРА І ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК CdTe, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ

Г. С. Хрипунов, Г. І. Копач, М. М. Харченко, А. І. Доброжан

Анотація. Для створення промислової технології отримання тонких плівок CdTe для базових шарів сонячних елементів та оптоелектронних сенсорів досліджено вплив фізико-технологічних режимів конденсації методом магнетронного розпилення на постійному струмі на кристалічну структуру та оптичні властивості вирощених плівок телуриду кадмію. З'ясовано, що при тиску інертного газу $P_{\text{арг}} = 0,9\text{-}1$ Па, струмі розряду $I = 80$ мА і напрузі на магнетроні $V = 600$ В нанесення плівок CdTe методом магнетронного розпилення на постійному струмі на протязі 25 хв. дозволяє отримувати текстуровані шари CdTe гексагональної модифікації, товщина яких 4900-5100 нм і ширина забороненої зони 1,52-1,54 еВ. Такі плівки телуриду кадмію інтенсивно поглинають світло в ІК області спектру. Після «хлоридної» обробки і послідууючого відпалу на повітрі в результаті фазового переходу вюртцит-сфалерит отримані плівки CdTe містять тільки стабільну кубічну модифікацію.

Ключові слова: телурид кадмію, магнетронне розпилення, плівки

STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF CdTe FILMS OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING

G. S. Khrypunov, G. I. Kopach, M. M. Harchenko, A. I. Dobrozhan

Abstract. To the creation of the industrial technology of CdTe thin film fabrication as base layers of solar cells and optoelectronic sensors it was studied the influence of physical and technological condensation modes of CdTe films grown by direct current (DC) magnetron sputtering on their crystal structure and optical properties. It was found that DC magnetron sputtering of CdTe film at the pressure of inert gas $P_{ar} = 0.9-1$ Pa, discharge current $I = 80$ mA and a magnetron voltage $V = 600$ V for 25 minutes allow to obtain textured layers of CdTe hexagonal modification with thickness 4900-5100 nm and band gap 1.52-1.54 eV. All obtained CdTe films intensively absorb light in the infrared spectrum. After the chloride treatment and subsequent annealing in air the obtained CdTe films contain only the stable cubic modification due to the sphalerite-wurtzite phase transition.

Keywords: cadmium telluride, magnetron sputtering, films

СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК CdTe, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Г. С. Хрипунов, Г. И. Копач, Н. М. Харченко, А. И. Доброжан

Аннотация. Для создания промышленной технологии получения тонких пленок CdTe для базовых слоев солнечных элементов и оптоэлектронных сенсоров исследовано влияние физико-технологических режимов конденсации методом магнетронного распыления на постоянном токе на кристаллическую структуру и оптические свойства выращенных пленок теллурида кадмия. Установлено, что при давлении инертного газа $P_{арг} = 0,9-1$ Па, токе разряда $I = 80$ мА и напряжении на магнетроне $V = 600$ В нанесение пленок CdTe методом магнетронного распыления на постоянном токе в течение 25 мин. позволяет получать текстурированные слои CdTe гексагональной модификации, толщина которых 4900-5100 нм и ширина запрещенной зоны 1,52-1,54 эВ. Такие пленки теллурида кадмия интенсивно поглощают свет в ИК области спектра. После «хлоридной» обработки и последующего отжига на воздухе в результате фазового перехода вюртцит-сфалерит полученные пленки CdTe содержат только стабильную кубическую модификацию.

Ключевые слова: теллурид кадмия, магнетронное распыление, пленки

Вступ

Тонкі плівки телуриду кадмію широко використовуються в якості базових шарів фотоелектричних перетворювачів на основі гетеросистем CdTe/CdS [1,2] та перспективні для використання в якості конструктивних елементів оптоелектронних сенсорів [3].

Реалізація високочастотного режиму магнетронного розпилення для отримання плівок телуриду кадмію дозволяє запобігати накопичуванню на поверхні мішені надлишкового електричного заряду [4], але цей метод є коштовним, енергоємним та потребує спеціального технологічного обладнання. Електронною промисловістю України освоєний високотехнологічний і економічний метод магнетронного розпилення матеріалів на постійному струмі. Однак при осадженні плівок телуриду кадмію цим методом виникають технологічні проблеми, які обумовлені низькою електропровідністю порошкових пресованих мішеней CdTe та достатньо низькою емісійною здатністю цього матеріалу.

Тому актуальними є дослідження впливу фізико-технологічних режимів конденсації методом магнетронного розпилення на постійному струмі на кристалічну структуру та оптичні властивості плівок телуриду кадмію.

Методика експериментальних досліджень

Досліджені плівки телуриду кадмію отримувалися методом магнетронного розпилення на постійному струмі при тиску 0,8-1 Па. У якості робочого газу використовувався аргон, тиск якого в вакуумній камері регулювався в ручному режимі.

В якості розпилюємого матеріалу використовувалась мішень, що представляла з себе диск діаметром 76 мм та товщиною 2-2,5 мм, виготовлений методом сухого пресування з порошку кадмій телуристого для напівпровідників марки «ч» (ТУ 6-09-01-429-77). Після виготовлення мішень була відпалена у вакуумі при залишковому тиску не менше $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, температурі 60-80 °С на протязі 3 годин. Мішень знаходилась на поверхні магнетрона зміненої конструкції. Особливість

використованої магнетронної конструкції полягала в тому, що контур охолодження охоплював тільки магнітну систему, в результаті чого не відбувалось примусове охолодження мішені.

Скляна підкладка розташовувалась в підкладкоутримувач, в який вмонтовано рухомий нагрівач. Після досягнення верхньої границі температур 430 °С над нерухомим нагрівачем підкладка пересувалась за допомогою маніпулятора в положення над мішенню. Розігрів мішені проводився на протязі 15 хв, що необхідно для стимуляції термоелектронної емісії електронів з матеріалу мішені для розпаду плазмового розряду. За рахунок того, що використовувалось два нагрівача, вдавалось підвищити температуру нагріву підкладки перед процесом розпилення до температур 290-320 °С.

Процес «тренування» мішені проводився на протязі 5 хв в режимах максимально наближених до технологічного режиму нанесення плівок, при цьому спостерігалось зростання струму плазмового розряду. Після процесу «тренування» мішені підкладка за допомогою рухомого підкладкотримача переводилась в положення над мішенню без зміни електричних параметрів розряду та тиску в камері. Відстань від підкладки до площини мішені становила 40 мм. Температура підкладки контролювалась за допомогою термопари.

Структура отриманих плівок телуриду кадмію досліджувалась рентгендифрактометричними методами [5]. Проводився автоматичний запис рентгенівських спектрів при θ -2 θ скануванні за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-4 з кроком 0,01-0,02 градуса в К α -випромінюванні кобальтового аноду.

Для точного визначення фазового складу отриманих плівок CdTe використовувалась метод «косих» зйомок, при яких в випромінюванні кобальтового анода в процесі θ -2 θ сканування проводилось виявлення та реєстрація дифракційних відображень від тих площин сфалеритної і вюрцитної модифікації телуриду кадмію, які з причин текстурування зразків не виявляються при викладеному вище способі реєстрації.

Період решітки зразків CdTe кубічної модифікації визначався за формулою:

$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}, \quad (1)$$

де d - міжплощинна відстань.

Для прецизійного визначення розміру кристалічної ґратки використовувався метод екстраполяції по Нельсону-Рілу.

Оптичні дослідження шарів CdTe проводились за допомогою спектрофото-метра СФ-2000.

Спектр пропускання досліджуваних плівок використовувався для визначення товщини шарів згідно [6]. Товщина шарів визначалась за формулою:

$$t = \frac{M \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{2(n(\lambda_1) \cdot \lambda_2 - n(\lambda_2) \cdot \lambda_1)} \quad (2)$$

де λ_1, λ_2 – довжини хвиль двох сусідніх екстремумів (інтерференційних максимумів або мінімумів спектрів пропускання) в нм; $n(\lambda_1), n(\lambda_2)$ – коефіцієнти переломлення, що залежать від довжин хвиль λ_1, λ_2 .

У випадку неможливості встановити значення товщини плівок оптичними методами, використовувався індикатор годинникового типу з похибкою 0,5 мкм.

Ширина забороненої зони тонких плівок визначалась шляхом розрахунку залежності коефіцієнта поглинання від довжини хвилі $\alpha(\lambda)$ за допомогою формули Бургера-Ламера:

$$T = (1 - R) \cdot e^{-\alpha \cdot t}, \quad (3)$$

де T - коефіцієнт пропускання; R - коефіцієнт відбиття; t - товщина плівки.

Екстраполяція лінійної ділянки залежності $(\alpha \cdot hv)^2 = f(hv)$ (де h – постійна Планка, ν - частота) до перетину з віссю енергії $h\nu$, дозволяє визначити ширину забороненої зони.

Для проведення «хлоридної» обробки згідно [7], на поверхню шару телуриду кадмію методом термічного вакуумного випаровування порошку CdCl₂ марки «ч» ГОСТ 4330-76 наносилася плівка CdCl₂ в лабораторній установці В30.2Sach. Випаровування

здійснювалося в наступному технологічному режимі: тиск у вакуумній камері – $5,3 \cdot 10^{-3}$ Па, температура випарника - 470-475 °С, струм випарника - 70 А, час випаровування 5 хвилин. Після осадження зразки розміщувалися в замкнутому об'ємі з двох скляних кювет і піддавалися відпалу на повітрі при температурі 430°С протягом 25 хвилин.

Результати та їх обговорення

При отриманні плівок телуриду кадмію методом магнетронного розпилення на постійному струмі використовувались різні фізико-технологічні режими: значення струму плазмового розряду (I), напруги на магнетроні (U), тиску робочого газу ($P_{\text{арг}}$), тривалості процесу конденсації (t), температури підкладки на початку процесу осадження плівок CdTe ($T_{\text{п поч}}$) та у кінці ($T_{\text{п кін}}$). Температура мішені становила 150-160 °С. Тривалість процесу нанесення плівок 15 та 25 хвилин. Технологічні режими отримання плівок телуриду кадмію приведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Технологічні режими отримання плівок CdTe

№	$T_{\text{п поч}},$ °С	$T_{\text{п кін}},$ °С	t , хв	$P_{\text{арг}},$ Па	U , В	I , мА
1	330	315	15	0,8-1	600	60
2	300	300	15	0,8-1	600	40
3	295	292	25	0,8-1	600	40
4	300	300	25	0,8-1	600	60
5	270	315	15	0,9-1	600	80
6	312	295	25	0,9-1	650	80
7	312	297	15	0,8-0,9	650	100
8	300	316	25	0,9-1	600	80
9	300	313	25	0,9-1	600	80

Типова дифрактограма плівок CdTe, отриманих при різних фізико-технологічних режимах конденсації (зразки 3, 4, 6, 7), на прикладі зразку № 6 приведена на рисунку 1.

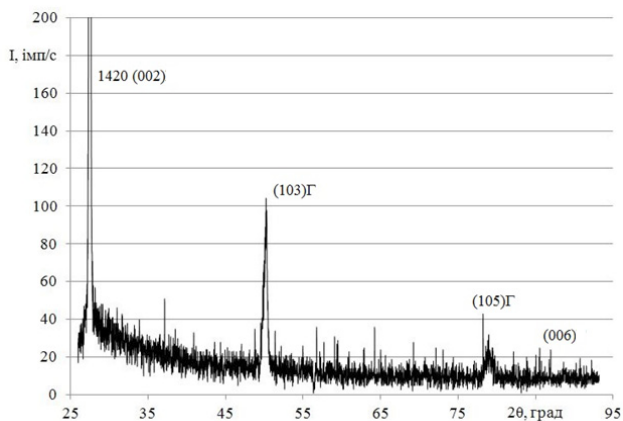


Рисунок 1. Дифрактограма зразку 6, типова для всіх отриманих зразків CdTe.

Для всіх дифрактограм зразків 3, 4, 6, 7 явні два двократних піка на кутах 2θ $27,05^\circ$ та $91,05^\circ$, що за таблицею ASTM 15-0770 можуть належати як до гексагональної, так і до кубічної модифікації CdTe: відбиття (002) та (006) вюрциту та відбиття (111) та (333) сфалериту, відповідно. Також на дифрактограмах спостерігаються відбиття (103) та (105) гексагональної фази.

Для точного визначення фазового складу отриманих плівок використовувався метод «нахильних» зйомок рентгенограм на кутах 2θ $72-85^\circ$ при повороті зразка на кут $20,5^\circ$. Вибір значення кута повороту зразку був обумовлений тим, що кут між напрямком [001] та [105] гексагональної модифікації складає $20,68^\circ$, а кути між напрямками [331] та [422] з напрямком [111] складають 22° та $19,47^\circ$. Для усіх зразків на ділянці 2θ $72-85^\circ$ спостерігається тільки відбиття (105) гексагональної фази. Відбиття (311) та (422) кубічної модифікації не виявлені. Таким чином, досліджені плівки телуриду кадмію, отримані в різних фізико-технологічних режимах конденсації методом магнетронного розпилення на постійному струмі, містять тільки метастабільну гексагональну модифікацію.

На рисунку 2 наведено спектральні залежності коефіцієнту пропускання плівок CdTe № 1-9 (табл. 1).

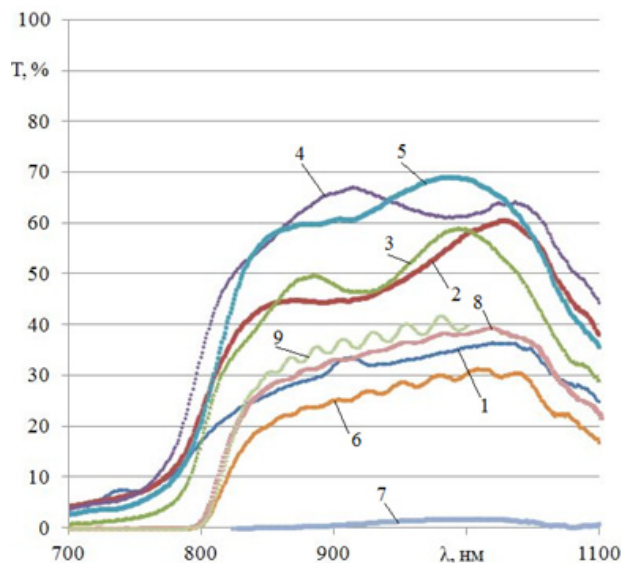


Рисунок 2. Спектральні залежності коефіцієнту пропускання зразків 1-9 відповідно.

Для всіх зразків спостерігається сильне поглинання в діапазоні довжин хвиль 400-700 нм та різкий край полоси поглинання в діапазоні 750-800 нм. В інфрачервоній області спектру прозорість плівок 4 та 5 становить на рівні 65%, зразків 2 та 3 – на рівні 50%, зразків 1, 6, 8 та 9 – на рівні 30%.

В таблиці 2 приведені результати визначення ширини забороненої зони та товщини плівок на основі оптичних досліджень. Непрозорість зразку 7 в усьому діапазоні спектру, обумовлено найбільшою товщиною цієї плівки.

**Таблиця 2
Значення ширини забороненої зони плівок CdTe різних товщин**

№	t, хв	I, мА	T, °C	Товщина плівки, нм	E _g , еВ
1	15	60	315	300	1,51
2	15	40	300	390	1,53
3	25	40	292	1030	1,51
4	25	60	300	2360	1,5
5	15	80	315	2120	1,52
6	25	80	300	5200	1,52
7	15	100	297	5500	-
8	25	80	316	4900	1,54
9	25	80	312	5000	1,53

На основі розрахованих значень товщин плівок CdTe, які відрізняються часом процесу конденсації, розрахована швидкість конденсації, яка залежить від струму плазмового розряду (рис. 3).

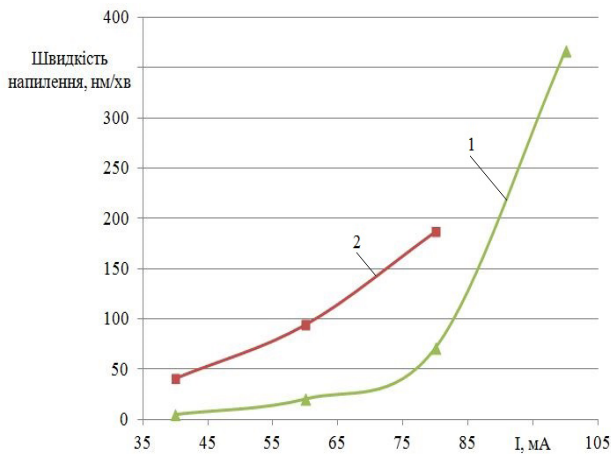


Рисунок 3. Залежність середньої швидкості осадження плівок CdTe від струму розряду в зазначених режимах для тривалості процесу конденсації 15 (1) та 25 (2) хвилин

Середня швидкість осадження плівок CdTe незалежно від часу конденсації зростає зі збільшенням струму плазмового розряду. Збільшення нахилу ділянок графіків при струмі розряду більше 60 мА вказує на те, що обраний режим роботи магнетрону забезпечує достатньо велике зростання швидкості осадження плівок. Той факт, що при тривалості процесу 25 хв. середня швидкість осадження плівки вища, ніж при тривалості процесу 15 хв., обумовлений одночасним протіканням двох процесів: розпиленням мішені та підвищенням швидкості сублимації матеріалу мішені при зростанні її температури за рахунок бомбардування іонами інертного газу.

Встановлені оптимальні фізико-технологічні режими нанесення плівок CdTe методом магнетронного розпилення на постійному струмі при значенні струму плазмового розряду 80 мА, при якому досягається достатньо висока швидкість конденсації 150-200 нм/хв. При однакових параметрах роботи магнетрону та тиску робочого газу відносна різниця товщин плівок CdTe не перевищує 2% (табл. 1, зразки 6, 8 та 9).

В роботі проведена «хлоридна» обробка зразка 8 (табл. 1).

На рис. 4 приведена рентгендифрактограма плівки телуриду кадмію після «хлоридної» обробки. Спостерігаються всі піки, що належать до стабільної кубічної модифікації CdTe. Методом «косих» зйомок на кутах 2θ 72,5-87,5° при розвороті зразка на 20,5° встановлено, що на цій ділянці дифрактограми спостерігаються тільки піки (331) та (422) кубічної модифікації, пік (105) гексагональної модифікації не виявляється. Таким чином, проведення «хлоридної» обробки сприяє фазовому переходу вюрцит-сфалерит, в результаті якого досліджені плівки CdTe містять тільки стабільну кубічну модифікацію.

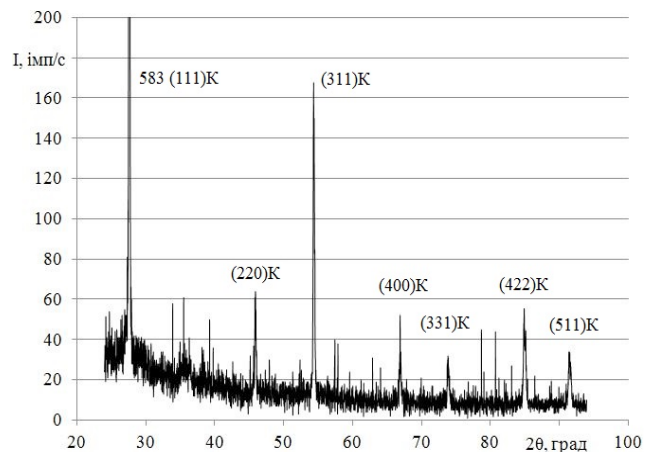


Рисунок 4. Дифрактограма зразка 8 після «хлоридної» обробки та відпалу на повітрі

Після «хлоридної» обробки спостерігається незначне зменшення ширини піків (111) та (333) в порівнянні з піками (002) та (006) гексагональної фази в зразках до проведення «хлоридної» обробки і відпалу на повітрі (рис. 1 та рис. 4). Це свідчить про перебіг процесу рекристалізації і зростання розміру зерен в полікристалічних плівках CdTe. Розраховане значення параметру кристалічної ґратки CdTe кубічної модифікації в плівках після «хлоридної» обробки становить $a = 6,4905 \text{ \AA}$. Відмінність від значення a за таблицею ASTM 15-0770 менше 0,2%.

Висновки

З'ясовано, що метод магнетронного розпилення на постійному струмі з попереднім нагрівом мішені дозволяє отримати швидкості осадження плівок CdTe 150-200 нм/хв.

Показано, що використання методу магнетронного розпилення на постійному струмі на протязі 25 хв. при наступних режимах конденсації: тиск інертного газу $P_{\text{арг}} = 0,91$ Па, струм плазмового розряду $I = 80$ мА і напруга на магнетроні $V = 600$ В. - дозволяє отримувати текстуровані шари CdTe гексагональної модифікації, товщина яких 4900-5100 нм. Ширина забороненої зони CdTe в отриманих плівках 1,52-1,54 еВ. Такі плівки телуриду кадмію інтенсивно поглинають світло в інфрачервоній області спектру і можуть бути використані для створення оптичних сенсорів.

Після «хлоридної» обробки з послідуєчим відпалом на повітрі при температурі 430°C на протязі 25 хв. в результаті фазового переходу вюртцит-сфалерит досліджені плівки CdTe, містять тільки стабільну кубічну модифікацію з параметром кристалічної ґратки $a = 6,4905$ Å, що менше ніж на 0,2% відрізняється від табличного значення.

Такі плівки CdTe можуть бути використані в якості базових шарів сонячних елементів.

Список використаної літератури

[1] X.Wu.High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells // Solar Energy, 96, pp. 803-814 (2004).

[2] A. Romeo, G. Khrypunov, F. Kurdesau, D.L. Bätzner, H. Zogg and A.N. Tiwari.High-efficient flexible CdTe solar cells on polymer substrates // Solar Energy Materials&Solar Cells, 90, pp. 664-677 (2006).

[3] Y. Gnatenko, R. Gamernyk, A. Borshch, N. Kukhtarev, T. Kukhtareva, P. Bukivskij, I. Faryna, V. Volkov, S. Paranchych, L. Paranchych. CdTe:Ti crystals: materials for optical sensors in the near-IR region // Proceedings of the SPIE, 5272, pp. 230-239 (2004).

[4] E. Berlin, L. Seydman. Poluchenie tonkih plenok reaktivnyim magnetronnyim raspyileniem // Tehnosfera, M. 256 s. (2014) (in Russian).

[5] P. A.Panchevka, O. G. Alaverdova, V. I.Gnidash. Heterophase state and polytexture of CdTe films deposited from the ion-molecular beam // Ukr. J. Phys., 45(1), pp.75-80 (2000).

[6] V.V. Brus, M.N. Solovan, E.V. Maystruk, I.P. Kozyarskiy, P.D. Maryanchuk, K.S. Ulyanitskiy, J. Rappich. Osobennosti opticheskikh i elektricheskikh svoystv polikristallicheskih plenok CdTe, izgotovlennyih metodom termicheskogo isparennya // Fizika tverdogo tela, 56(10), pp. 1886-1890 (2014) (in Russian).

[7] N.M. Kharchenko, G.S. Khripunov, T.A. Li. Technology optimization of the chloride treatment of cadmium chalcogenide thin films // PSE, 6(3-4), pp. 128-133 (2008).

Стаття надійшла до редакції 08.06.2016 р.

PACS number(s): 73.20.Hb, 73.25.+i
UDC 621.315.592

STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF CdTe FILMS OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING

G. S. Khrypunov, G. I. Kopach, M. M. Harchenko, A. I. Dobrozhan

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Summary

The aim of this study was to determine the influence of physical and technological condensation modes of cadmium telluride (CdTe) films obtained by direct current magnetron sputtering on their crystal structure and optical properties.

The structure of CdTe films was investigated by X-Ray diffractometry methods with automatic recording of X-ray spectra in scanning θ - 2θ mode and “oblique” filming. Optical properties of CdTe layers were studied using a SF-2000 spectrophotometer. The values of layer thickness and band gap of CdTe films were determined.

It is found that the method of DC magnetron sputtering with preheating target provides a rate of CdTe film deposition of 150-200 nm/min. It is shown that the conditions of DC magnetron sputtering condensation such as pressure of an inert gas $P_{\text{arg}}=1-0.9$ Pa, plasma discharge current $I=80$ mA and the magnetron voltage $V=600$ V during 25 minutes allow to obtain textured hexagonal CdTe layers with a thickness of 4900-5100 nm. The band gap of the obtained CdTe films was 1.52-1.54 eV. Such films of CdTe intensively absorb light in the infrared spectrum and can be used to create optical sensors. After the chloride treatment followed by annealing in air at a temperature 430°C for 25 minutes studied CdTe films due to wurtzite-sphalerite phase transition contain only the stable cubic phase with lattice parameter $a=6,4905$ Å, which differs from the tabular valueless than 0.2%.

Keywords: cadmium telluride, magnetron sputtering, film

PACS number(s): 73.20.Hb, 73.25.+i
УДК 621.315.592

СТРУКТУРА І ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК CdTe, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ

Г. С. Хрипунов, Г. І. Копач, М. М. Харченко, А. І. Доброжан

Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»,

Реферат

Досліджено вплив фізико-технологічних режимів конденсації методом магнетронного розпилення на постійному струмі на кристалічну структуру та оптичні властивості плівок телуриду кадмію.

Структура отриманих плівок телуриду кадмію досліджувалась рентгендифрактометричними методами: а саме проводився автоматичний запис рентгенівських спектрів при θ - 2θ скануванні та використовувався метод «косих» зйомок. Оптичні дослідження шарів CdTe проводились за допомогою спектрофотометра СФ-2000, визначались значення товщини шарів та ширина забороненої зони CdTe в плівках.

З'ясовано, що метод магнетронного розпилення на постійному струмі з попереднім нагрівом мішені дозволяє отримати швидкості осадження плівок CdTe 150-200 нм/хв. Показано, що використання методу магнетронного розпилення на постійному струмі на протязі 25 хв. при наступних режимах конденсації: тиск інертного газу $P_{\text{арг}} = 0,91$ Па, струм плазмового розряду $I = 80$ мА і напруга на магнетроні $V = 600$ В. - дозволяє отримувати текстуровані шари CdTe гексагональної модифікації, товщина яких 4900-5100 нм. Ширина забороненої зони CdTe в отриманих плівках становить 1,52-1,54 еВ. Такі плівки телуриду кадмію інтесивно поглинають світло в інфрачервоній області спектру і можуть бути використані для створення оптичних сенсорів. Після «хлоридної» обробки з послідуочим відпалом на повітрі при температурі 430°C на протязі 25 хв. в результаті фазового переходу вюртцит-сфалерит досліджені плівки CdTe, містять тільки стабільну кубічну модифікацію з параметром кристалічної ґратки $a = 6,4905$ Å, що менше ніж на 0,2% відрізняється від табличного значення.

Ключові слова: телурид кадмію, магнетронне розпилення, плівки