

УДК 535.3, 535.5

Дмитрів А.М.

Механізми утворення твердих розчинів $Cd_{1-x}Mn_xTe$

¹Івано-Франківський національний медичний університет,
буль. Галицька, 124 к, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна

Запропоновано кристалоквазіхімічні рівняння дефектної підсистеми у твердих розчинах $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($0,0 \leq x \leq 0,2$) р-типу провідності, на основі яких розраховано зміну концентрації точкових дефектів і носіїв струму у межах області гомогенності. Показано, що домінуючими акцепторами у р- $Cd_{1-x}Mn_xTe$ є однократно заряджені вакансії кадмію, ефективність яких зростає із збільшенням надстехіометрії телуру у вихідній матриці і зменшується із ростом вмісту MnTe. Проведено порівняльний аналіз дефектної підсистеми твердого розчину $Cd_{1-x}Mn_xTe$ з використанням кристалоквазіхімічного моделювання і експериментальних результатів по вимірюванню ефекту Холла.

Ключові слова: наносистема, шаруваті кристали, селеніди індію, дифракція повільних електронів, скануючі тунельні мікроскопія та спектроскопія, топографія, атомна структура.

A. Dmytriv

Mechanisms of production of CdTe-MnTe system solid solutions

¹Ivano-Frankivsk National Medical University,
124 k, Galytka Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine

It has been suggested crystal-quasi-chemical equations of defective subsystem in solid solutions $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($0,0 \leq x \leq 0,2$) of p-type conductivity. On their basis the change of point defects concentrations and current carriers within the confines of the homogeneity domain has been estimated. It has been demonstrated that singly charged cadmium vacancies, effectiveness of which improves with the increase of tellurium superstoichiometry in the parent matrix and decreases with the increase of MnTe content, are dominant acceptors. Comparison study of the defective subsystem of the solid solution $Cd_{1-x}Mn_xTe$ has been made using crystal-quasi-chemical modeling and experimental results of Hall measurements

Key words: cadmium telluride, solid solutions, defects, sphalerite, annealing.

Стаття постуила до редакції 20.09.2017; прийнята до друку 25.12.2017.

Вступ

Напівпровідникові матеріали кадмій телурид та тверді розчини на його основі найбільш широко використовуються у напівпровідниковій техніці, як інфрачервоні пристрої оптоелектроніки, детектори іонізуючого випромінювання, фотоелементи і т. д. Широкі можливості їх використання вимагають створення матеріалів із наперед заданими властивостями які у великій мірі визначаються їх точковими дефектами і механізмами утворення. На даний час незважаючи на численну кількість публікацій у цьому напрямку, дискусійними є питання про природу точкових дефектів як у кристалах кадмій телуриді так і у твердих розчинах на його основі [1,5].

У [7, 8] відмічено, що CdTe і MnTe утворюють обмежений ряд твердих розчинів, оскільки вони мають різну кристалічну структуру.

Ділянка твердих розчинів на основі CdTe за 1070 K (фаза $Cd_{1-x}Mn_xTe$) знаходиться в межах від 0 до 71 мол. % MnTe [7]. Зразки в межах 71,5 – 99,6 мол. % MnTe були двофазними і містили фази $Cd_{1-x}Mn_xTe$ (ґратка типу сфалериту) і $Cd_yMn_{1-y}Te$ (структура типу NiAs). Протяжність твердих розчинів на основі MnTe не перевищує 2 мол. % за 1073 K [7]. Насичений розчин MnTe в CdTe за результатами різних робіт складає від 72,5 мол. % до 77 мол. % [8] і практично не залежить від температури. В роботі [9] з допомогою РФА досліджено фазові співвідношення в потрібній системі CdTe-MnTe-Te за 673 K і виділено шість гетерогенних ділянок, які мають різний склад.

За даними X-променевого аналізу тверді розчини $Cd_{1-x}Mn_xTe$, за температури загартування від 1070 K, за складом від 0 до 71 мол. % MnTe містять одну фазу (фаза $Cd_{1-x}Mn_xTe$) структури сфалериту [6]. Концентраційна залежність

параметра a від складу підпорядковується правилу Вегарда, тобто залежність $a(x)$, де x – мольна частка MnTe, можна описати лінійним рівнянням: $a, \text{ нм} = 0,6491 - 0,0152 \cdot x$.

На основі результатів ДТА і літературних даних за лініями ліквідуса [8] побудована фазова діаграма системи CdTe-MnTe [6]. Побудова проведена з припущенням, що CdTe і β -MnTe утворюють неперервний ряд твердих розчинів за $T > 1228 \text{ K}$. Нижче 1228 K внаслідок β - α -поліморфного перетворення MnTe і твердих розчинів в межах 71,4 – 100 мол. % MnTe спостерігається утворення двох фаз – α і β .

Електричні властивості кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($0,1 \leq x \leq 0,3$), відпалених за різних технологічних умов досліджували в роботі [10]. Була висловлена думка, що покращення стабільності електрофізичних параметрів відпалених в атмосфері аргону і повільному охолодженні зразків може бути пояснена зменшенням кількості ВТД ($V_{\text{Cd}}^-, V_{\text{Cd}}^{2-}$) і домішковими дефектами, які утворюють асоціати з невеликою енергією зв'язку, внаслідок наближення стану кристалу до рівноважного під час охолодження.

Одержані монокристали $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($x = 0,04$) р-типу [11] провідності характеризуються шириною забороненої зони $E_g = 1,507 \text{ eV}$ із акцепторною домішкою з енергією йонізації $0,68 \text{ eV}$ для високоомних кристалів та $0,34 \text{ eV}$ для низькоомних. Акцепторні рівні у твердому розчині КМТ виявлені і у роботі [12] при вимірюванні спектрів ФЛ було виявлено три смуги випромінювання, за якими автори роботи [12] припускають існування акцепторів із комплексом, який зв'язує атоми I групи у підгратці кадмію ($\text{Cu}_{\text{Cd}}, \text{Ag}_{\text{Cd}}$) і розміщені поряд атоми Mn – $(\text{Mn}_{\text{Cd}}\text{Cu}_{\text{Cd}})^0$. Не виключеними у твердому розчині є акцептори пов'язані з дефектами катіонної підгратки і близько розміщеного мілкого донорного дефекту: $(V_{\text{Cd}}^+ \text{Di})'$, а також акцептори пов'язані із неконтрольованою домішкою кисню, концентрація якої для твердих розчинів у $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ становить $\approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [13]. Домішкові центри, зв'язані можливо із атомами кисню при дослідженні кінетики фотопоглинання в кристалах $\text{Cd}_{0,65}\text{Mn}_{0,35}\text{Te}$, виявлені і у роботі Агеяна [14].

За даними [15], енергетичне положення рівня Mn в CdTe, відщепленого від валентної зони, оцінюється значенням $\approx 36 \text{ meV}$, що суперечить результатам роботи $\approx 50 \text{ meV}$ при $x > 0,05$. Таким чином, зміна енергії акцептора від ≈ 32 до $\approx 50 \text{ meV}$ з ростом x ($0 \leq x \leq 0,05$), як і встановлення природи дефекту, потребує наступних досліджень.

Таким чином, природа акцепторних рівнів у КМТ на сьогодні до кінця не встановлена і носить дискусійний характер.

У даній роботі запропоновані кристалоквазіхімічні механізми дефектної підсистеми утворення твердого розчину заміщення р- $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($0,0 \leq x \leq 0,2$), на основі

яких проведено розрахунок точкових дефектів і носіїв струму. Розраховані значення холлівської концентрації носіїв струму було порівняно із експериментальними результатами, що приведеними у роботі [12].

За результатами вимірювання ефекту Холла [12] у кристалах $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($0,0 \leq x \leq 0,1$) підтверджений р-тип провідності із рухливістю дірок за кімнатних температур в межах $52 - 64 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Питомий опір досліджуваних кристалів при кімнатній температурі практично не залежить від складу і знаходився в межах $1 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Концентрація дірок для р- $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 0,1$) за 300 K із ростом вмісту MnTe зменшувалася в межах $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

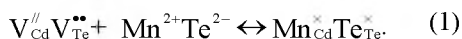
1. Кристалоквазіхімічні рівняння утворення точкових дефектів у $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$

В основу методу кристалоквазіхімії [17] покладено суперпозицію кристалоквазіхімічної формули досліджуваної матриці $\text{Cd}_{\text{Cd}}^x\text{Te}_{\text{Te}}^x$ із кристалоквазіхімічним складом (кластером). Кристалоквазіхімічний склад формується шляхом накладання антиструктури кадмії телуриду ($V_{\text{Cd}}''V_{\text{Te}}^{2+}$ – сфалерит), яку утворюють двократно йонізовані негативні та позитивні вакансії кадмію і телуру з кристалохімічним складом доданої речовини. Заряди дефектів у кристалоквазіхімії позначають таким чином: x – нейтральні, \bullet – позитивні, $'$ – негативні, кількість цих знаків відповідає кратності йонізації, e' – електрони, h^{\bullet} – дірки.

Метод кристалоквазіхімії дає можливість паралельно проаналізувати кристалохімічну сумісність, чи несумісність утворення тих чи інших дефектів. Під кристалохімічною сумісністю розуміють як розмірну так і електронну відповідність. Перша враховує умову стійкості кристалічної структури, яка можлива тільки при визначених співвідношеннях розмірів домішкового атома і заміщувачої ним позиції. Позиціями у кристалі можуть бути або атоми кристалічної сполуки, в цьому випадку говорять про твердий розчин типу заміщення, або порожнини в кристалічній ґратці, в цьому випадку утворюється твердий розчин вкорінення. Під електронною відповідністю розуміють можливість утворення стійкого хімічного зв'язку між домішковим атомом і оточуючими його атомами в кристалі.

За допомогою методу кристалоквазіхімії можна не тільки аналізувати природу точкових дефектів у твердих розчинів, а й розраховувати концентрацію носіїв струму і точкових дефектів.

Так утворення твердого розчину заміщення $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ згідно уявлень кристалоквазіхімії буде проходити шляхом ізовалентного заміщення атомів кадмію атомами мангану, при такому заміщенні легуючий кластер записується як:



У залежності від відхилення від стехіометрії, у межах області гомогенності $Cd_{1-x}Mn_xTe$, матеріал можна одержати як p- так і p-типу провідності. Зокрема, при надлишку металу в

$$(1-\delta) \left[(Cd_{1-\alpha+\alpha\alpha}^{\times} V_{b\alpha}'' V_{(1-a-b)\alpha}'')_{Cd} (Te_{1-\alpha}^{\times} V_{\alpha}'')_{Te} (Cd_{(1-a)\alpha}^{\times})_i + (2+b)\alpha\epsilon' \right] + \delta (Mn_{Cd}^{\times} Te_{Te}^{\times}) \rightarrow \quad (2)$$

$$\rightarrow (Cd_{((1-\alpha+\alpha\alpha)(1-\delta)}^{\times} V_{b(1-\delta)\alpha}'' V_{(1-a-b)(1-\delta)\alpha}'' Mn_{\delta}^{\times})_{Cd} (Te_{(1-\alpha)(1-\delta)+\delta}^{\times} V_{\alpha(1-\delta)}'')_{Te} (Cd_{(1-a)(1-\delta)\alpha}^{\times})_i + (2+b)(1-\delta)\alpha\epsilon'$$

$$(1-\delta) \left[(Cd_{1-\beta}^{\times} V_{c\beta}'' V_{(1-c)\beta}'')_{Cd} Te_{Te}^{\times} (Te_{i\beta}^{\cdot}) + 3\beta h^{\cdot} + c\beta\epsilon' \right] + \delta (Mn_{Cd}^{\times} Te_{Te}^{\times}) \rightarrow \quad (3)$$

$$\rightarrow (Cd_{(1-\beta)(1-\delta)}^{\times} V_{c\beta(1-\delta)}'' V_{(1-c)(1-\delta)\beta}'' Mn_{\delta}^{\times})_{Cd} (Te_{\times}^{\times} Te_{i\beta(1-x)}^{\cdot})_{Te} + 3\beta(1-\delta)h^{\cdot} + c(1-x)\beta\epsilon'$$

$$c\beta(1-\delta)[V_{Cd}''] + (1-c)(1-\delta)\beta[V_{Cd}''] + \beta(1-x)[Te_i^{\cdot}] + n = p, \quad (4)$$

$$n_n = c\beta(1-\delta)[V_{Cd}''] + (1-c)(1-\delta)\beta[V_{Cd}''] + \beta(1-x)[Te_i^{\cdot}]. \quad (5)$$

основній матриці CdTe кристалоквазіхімічний склад твердого розчину такий:

При відхиленні від стехіометрії у сторону телуру кристалоквазіхімічне рівняння утворення твердого розчину $Cd_{1-x}Mn_xTe$ наступне:

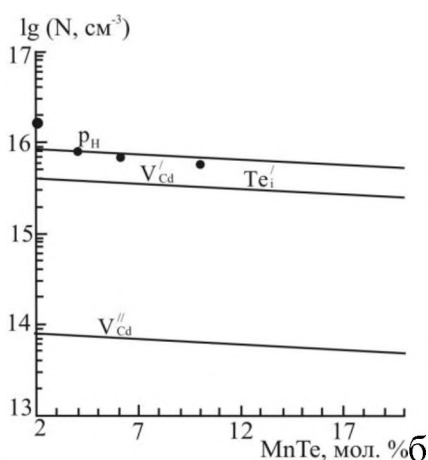
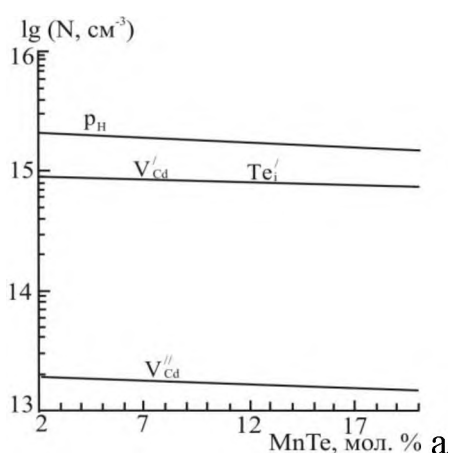


Рис. 1. Розраховані значення концентрації дефектів N і холлівської концентрації носіїв струму (p_n) системи p-CdTe-MnTe при надстехіометрії телуру β : а – $1,6 \cdot 10^{-5}$ ат. % (918 K); б – $6,4 \cdot 10^{-5}$ ат. % (1015 K); ● – експериментальні значення [12].

У рівняннях (2, 3) коефіцієнти α, β вказують на відхилення від стехіометрії в основній матриці CdTe атомів Cd, Te. Коефіцієнт δ вказує на вміст MnTe у твердому розчині. Додаткові коефіцієнти a, b, c, x приймаємо рівними: $a = 0,5$, за рахунок можливого проходження механізму заміщення вакансій кадмію і вкорінення у міжвузля кадмію у рівних кількостях; $b = 0,48, c = 0,99$ – коефіцієнти, які показують частку однократно заряджених вакансій кадмію, внаслідок можливого диспропорціонування двократно заряджених вакансій кадмію, визначали методом підбору із рівняння електронейтральності; x – коефіцієнт, який показує частку утворення електронейтрального дефекту заміщення Te^{\times} у матеріалі (3) і враховує можливість розміщення телуру в міжвузлях, визначається вмістом MnTe у твердому розчині.

Процес дефектоутворення у матеріалах (2), (3) є набагато складнішим, якщо враховувати можливе комплексоутворення між власними точковими дефектами вихідної матриці і неконтрольованими домішками, якими у $Cd_{1-x}Mn_xTe$

можуть бути первнів I групи як вузлового, так і міжвузлового типів. Можливе утворення акцепторних комплексів $(Mn_{Cd}^{\times} V_{Cd}'' D_i^{\cdot})'$.

$(Mn_{Cd}^{\times} Cu_{Cd}^{\cdot}) \cdot (V_{Cd}'' D_i^{\cdot})'$ розглядається в роботі [12].

Присутність комплексів у даних матеріалах призводить до зв'язування електронів у матеріалі (3) при наявності у них неконтрольованих домішкових дефектів заміщення: $Cu_{Cd}^{\cdot}, Ag_{Cd}^{\cdot}$ і вкорінення D_i^{\cdot} , де D – первнів I групи. Запис кристалоквазіхімічних рівнянь з врахуванням домішкових атомів I групи у малих кількостях є досить громіздким і наближеним, тому кристалоквазіхімічне моделювання утворення комплексів у матеріалі не розглядаємо.

2. Розрахунок концентрації точкових дефектів і холлівської концентрації носіїв струму

Розрахунок концентрації точкових дефектів і носіїв струму у твердому розчині $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($0,0 \leq x \leq 0,2$) проводили для матеріалу із p-

типом провідності (3). Провідність матеріалу підтверджена експериментальними результатами у роботі [12].

Для розрахунків використовували рівняння електронейтральності, яке характерне для матеріалу (3).

Так як концентрацію дефектів і носіїв струму природно виражати числом частинок в одиниці об'єму (см^{-3}) тому виразимо мольні частки концентрації дефектів в одиницях см^{-3} .

Згідно [18] концентрація частинок бінарної сполуки в 1 см^3 визначається:

$$n = \frac{2\rho N_A}{M} \varepsilon, \quad (6)$$

де ρ – густина ($\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$), $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$, M – молярна маса ($\text{г}\cdot\text{моль}^{-1}$).

Враховуючи, що густину можна визначити через параметр елементарної ґратки (a) [18] як

$$\rho = \frac{MZ}{N_A a^3}, \quad (7)$$

де Z – число структурних одиниць (молекул) в елементарній ґратці ($Z = 4$ для сфалеритної структури).

Для n остаточно отримаємо:

$$n = \frac{2Z}{a^3} \varepsilon. \quad (8)$$

Зауважимо, що у нашому випадку ε – це коефіцієнти в рівнянні електронейтральності (5) біля відповідних дефектів та вільних носіїв заряду, які враховують частку йонного зв'язку між атомами основної матриці Cd – Te (приймаємо 20 %). Відхилення від стехіометрії атомів телуру β для основної матриці кадмію телуриду знаходили із T-x діаграми діяльності існування CdTe наведеної у роботі [19] для двох температур (918 та 1015 K), за результатами відхилення яких спостерігався найбільш узгоджений результат з експериментом [12]. Значення параметра ґратки a від складу визначали із рівняння: $a, \text{ нм} = 0,6491 - 0,0152 \cdot x$ [6].

Результати розрахунків для $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($0,0 \leq x \leq 0,2$) для різного відхилення від стехіометрії телуру (β) із зміною складу MnTe наведені на рис.

З аналізу залежностей холлівської концентрації дірок p_n (рис.1) видно, що експериментальні результати добре узгоджуються із розрахованими при надстехіометрії телуру основної матриці CdTe $6,4 \cdot 10^{-5}$ ат. %. При цьому відповідальними за p -тип провідності матеріалу є одно- і дво- зарядні вакансії кадмію $V_{\text{Cd}}^I, V_{\text{Cd}}^{II}$, концентрація яких із збільшенням вмісту MnTe зменшується (рис.1). Характерна залежність “склад-концентрація точкових дефектів і носіїв струму” спостерігається для різного значення відхилення від стехіометрії атомів телуру в $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ (рис.1).

Загальною закономірністю при утворенні твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($0,0 \leq x \leq 0,2$) є зменшення абсолютної величини концентрації всіх дефектів N_i із збільшенням вмісту MnTe. Переважаючими акцепторами у $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ є однократно заряджені вакансії кадмію V_{Cd}^I (рис.), концентрація яких зростає із збільшенням надстехіометрії телуру (β) у CdTe і зменшується із ростом складу MnTe у твердому розчині. Розраховані значення холлівської концентрації носіїв струму також зменшуються (рис.) і мають добру узгодженість з експериментальними результатами при надстехіометрії телуру основної матриці CdTe $6,4 \cdot 10^{-5}$ ат. % (1015 K).

У $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ постійна ґратки a зменшується з ростом x [6]. Для нас це означає, що основним механізмом дефектоутворення твердого розчину є механізм заміщення. Оскільки центри заміщення Mn_{Cd} призводять до зменшення параметра ґратки кристалічної структури твердого розчину $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, так як йонний радіус Mn менший радіуса заміщуючого йона Cd на 0,002 нм [20].

Поряд із вузловим заміщенням манган (згідно йонного радіусу) може розміщатися в октапорожнинах підґратки телуру або при великій його концентрації заміщувати атоми телуру з утворенням антиструктурного дефекту. Однак, утворення таких дефектів є малоймовірним із-за відсутності їх характеристик при дослідженні спектрів ФЛ і ЕПР у роботах [12-16].

Висновки

1.Методом кристалоквазіхімії проаналізовано процеси дефектоутворення у твердих розчинах $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$. На основі запропонованих кристалоквазіхімічних рівнянь виконано розрахунок концентрації точкових дефектів і носіїв струму.

2. Показано, що утворення центрів заміщення Mn_{Cd} у $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, із зростанням вмісту MnTe, призводить до зменшення сталої кристалічної ґратки сфалеритної структури і основним механізмом дефектоутворення твердих розчинів є механізм заміщення катіонних вакансій атомами металу.

3. Встановлено, що у твердих розчинах $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ переважають однократно заряджені вакансії кадмію V_{Cd}^- концентрація яких зростанням із збільшенням надстехіометрії халькогену у вихідній матриці і зменшується із ростом вмісту MnTe. Розраховані значення холлівської концентрації носіїв струму і точкових дефектів при надстехіометрії телуру $6,4 \cdot 10^{-5}$ ат. % (1015 K) добре співпадають із експериментальними результатами.

Література

1. Ванярхо В. Г., Зломанов В. П., Новоселова А. В. Физико-химическое изучение теллурида марганца // Неорганические материалы. – 1970. – Т. 6, №7. – С. 1257–1259.
 2. Mann G. S., Van Vlack L. H. Fe_{1,2}Te-MnTe Phase Relationships in the Presence of Excess Iron // Metall. Trans. B. – 1977. – V. 8, №1. – P. 53–57.
 3. Mateika D. Growth of the MnTe Single Crystals from Nonstoichiometric Melts by Liquid Encapsulation // J. Cryst. Growth. – 1972. – V. 13-14. – P. 698–701.
 4. Абрикосов Н. Х., Дюльдина К. А., Жданова В. В. Исследование системы Mn-Te // Неорганические материалы. – 1968. – Т. 4, №11. – С. 1878–1884.
 5. Westrum E. F., Gronvold F. Manganese Disulfide (Hauerite) and Manganese Ditelluride. Thermal Properties from 5 to 300 K and Antiferromagnetic Transitions // J. Chem. Phys. – 1970. – V. 59, №7. – P. 3820–3826.
 6. Один И. Н., Чукичев В., Рубина М. Э. Фазовая диаграмма и люминесцентные свойства растворов системы CdTe-MnTe // Неорганические материалы. – 2003. – Т. 39, №4. – С. 425–428.
 7. Rajczkowska A. Physicochemical Properties and crystal Growth of A₂B₆-MnB₆ systems // Prog. Crystal Growth Charact. – 1978. – V. 1, №2. – P. 289–325.
 8. Triboulet R., Didier G. Growth and Characterization of Cd_{1-x}Mn_xTe Crystals; Contribution to the CdTe-MnTe Pseudobinary Phase Diagram Determination // J. Cryst. Growth. – 1981. – V. 52. – P. 614–618.
 9. Мамонтов М. Н., Севастьянова Л. Г. Фазовые соотношения в тройной системе CdTe-MnTe-Te при 643 К // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32, № 7. – С. 810–815.
 10. Савицкий А. В., Илацук М. И., Парфенюк О. А., Иванчук Р. Д., Иванчук Д. Д., Ульяницкий К. С. Влияние отжига монокристаллов Cd_{1-x}Mn_xTe на стабильность их электрофизических параметров // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32, № 8. – С. 957–959.
 11. Косяченко Л. А., Марков А. В., Масляничук Е. Л., Раренко И. М., Склярчук В. М. Особенности электропроводности монокристаллов Cd_{1-x}Zn_xTe и Cd_{1-x}Mn_xTe // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, № 12. – С. 1420–1426.
 12. Власенко А. И., Бабенцов В. Н., Власенко З. К., Свечников С. В., Раренко И. М., Захарук З. И., Никонюк Е. С., Шляховый В. Л. Акцепторы в Cd_{1-x}Mn_xTe (x < 0,1) // Физика и техника полупроводников. – 1997. – Т. 31, № 8. – С. 1017–1020.
 13. Морозова Н. К., Каретников И. А., Блинов В. В., Комарь В. К., Галстян В. Г., Зимгорский В. С. Зависимость свойств кристаллов Cd_{1-x}Zn_xTe от типа собственных точечных дефектов и форм присутствия кислорода // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 5. – С. 569–573.
 14. Агекян В. Ф., Серов А. Ю., Степанов Ю. А., Ле Тхай Лай. Фотоиндуцированное поглощение света в твердом растворе Cd_{0,65}Mn_{0,35}Te с высокой концентрацией дефектов // Физика твердого тела. – 1995. – Т. 37, № 4. – С. 1090–1096.
 15. Gellin N., Szapiro S. Calculation of the partial vapor pressures of tellurium and cadmium over non-stoichiometric CdTe in temperature range 750-1059 °C // J. Cryst. Growth. – 1985. – V. 73. – P. 77–82.
 16. Партыка Я., Жуковский П. В., Венгрэк П., Родзик А., Сидоренко Ю. В., Шостак Ю. А. Электронный парамагнитный резонанс соединений Cd_{1-x}Mn_xTe и Zn_{1-x}Mn_xTe // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, №12. – С. 1432–1436.
 17. Фрейк Д. М., Дмитрів А. М., Жуковські П. В., Межиловська Л. Й. Атомні дефекти і фізико-хімічні властивості твердих розчинів Cd_{1-x}Mn_xTe з участю кисню при відпалі // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т. 5, № 1. – С. 147–152.
 18. Креггер Ф. Химия несовершенных кристаллов. – М.: Мир, 1969. – 654 с.
 19. Матвеев О. А., Терентьев А. И. Самокомпенсация в CdTe<Cl> в условиях фазового равновесия кристалл–пар кадмия (теллура) // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, №2. – С. 159–163.
- Семилетов С. А. Тетраэдрические и октаэдрические ковалентные радиусы // Кристаллография. – 1976. – Т. 21, №4. – С. 752–758.

Дмитрів Анжела Миколаївна – кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії фармацевтичного факультету Івано-Франківського національного медичного університету.