

5. Выводы

1. На основании модельных экспериментов установлено изменение формы осадков электроосаждаемых металлов под влиянием центробежной силы, включающее простоты длины и толщины осадков в

направлении действия силы с изменением их конфигурации в зависимости от величины перегрузки.

2. Полученные результаты доказывают достоверность явления электрохимического фазообразования металлических материалов через стадию жидкого состояния.

Литература

1. Гирин, О. Б. Увеличение плотности электроосаждаемых металлов под действием центробежной силы [Текст] / О. Б. Гирин, И. Д. Захаров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/5. – С. 4–6.
2. Гирин, О. Б. Волнообразное течение поверхностных слоев электроосаждаемых металлов под действием центробежной силы [Текст] / О. Б. Гирин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/5. – С. 22–27.
3. Оно, А. Затвердевание металлов [Текст] / А. Оно ; пер. с англ. Э. В. Захарченко. – М. : Металлургия, 1980. – 152 с.

Досліджено вплив фонові домішки кисню на дефектну підсистему твердого розчину $Cd_{1-x}Zn_xTe$. На основі експериментальних результатів і кристаллоквазіхімічних моделей у матеріалі розраховано концентрацію носіїв струму і точкових дефектів

Ключові слова: твердий розчин, дефекти, сфалерит, кисень

Исследовано влияние фоновой примеси кислорода на дефектную подсистему твердого раствора $Cd_{1-x}Zn_xTe$. На основании экспериментальных результатов и кристаллоквазіхимических моделей в материале рассчитана концентрация носителей тока и точечных дефектов

Ключевые слова: твердый раствор, дефекты, сфалерит, кислород

The influence of background impurities of oxygen to defective subsystem solid solution $Cd_{1-x}Zn_xTe$ is researched. Based on experimental results and the crystalloquasichemical models in the material is calculated carrier density and point defects

Keywords: solid solution, defects, sfaleryt, oxygen

УДК 535.3, 535.5

ВПЛИВ ФОНОВОЇ ДОМІШКИ КИСНЮ НА ДЕФЕКТНУ ПІДСИСТЕМУ $CD_{1-x}ZN_xTE$

А. М. Дмитрів

Кандидат хімічних наук, доцент*
Контактний тел.: (0342) 58-27-20
E-mail: dmytriv-ang@mail.ru

О. Л. Сав'як

Асистент**
Контактний тел.: (0342) 53-13-22

О. В. Боднарчук

Кандидат хімічних наук, доцент
*Кафедра хімії

Івано-Франківський національний медичний університет
вул. Галицька, 124 а, м. Івано-Франківськ, Україна, 76008
Контактний тел.: (0342) 58-27-20
E-mail: olesya_bodn@mail.ru

І. Д. Сиротинська

Кандидат хімічних наук, доцент
**Кафедра біохімії з курсом біонеорганічної, фізколоїдної та біорганічної хімії Івано-Франківського національного медичного університету
вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018
Контактний тел.: (0342) 53-13-22
E-mail: irenka.933@gmail.com

1. Вступ

Напівпровідникові тверді розчини $Cd_{1-x}Zn_xTe$ досить перспективні для створення на їх основі високоефективних детекторів великої площі та реєстрації гамма-випромінювання, що обумовлено великим значенням ширини забороненої зони і атомного номера цинку, а також можливістю одержання матеріалу з питомим опором 10^{10} Ом·см [1].

У результатах роботи [2] показано, що при 899 К в системі ZnTe-CdTe утворюється неперервний ряд TP структури сфалериту, відсутнє розшарування, сублімація проходить інконгурентно. Водночас не виключають розшарування при 780 К.

Проведені рентгенівські дослідження кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0,1-0,2$) в [3] показують, що вміст Te в однофазній області близький до 50 %, а вміст Cd і Zn досить рівномірний в об'ємі матеріалу: Cd – $42,31 \pm 0,47$ ат. % і Zn – $7,03 \pm 0,62$ ат. %.

Природа точкових дефектів у кристалах КЦТ теж носить спірний характер, зокрема, до цього часу немає єдиної думки про вид і заряд власних і домішкових точкових дефектів та їх компенсацію. На даний час частково дослідженні деякі оптичні властивості кристалів [1]. Що стосується електричних, то їх дослідження ускладнені, особливо при азотних і гелієвих температурах, тобто саме в тих випадках, коли можна одержати найбільш цінну інформацію про концентрацію вільних носіїв струму, енергіях іонізації домішкових рівнів, співвідношення концентрацій донорів і акцепторів і т. д. [4].

В роботі [5] показано, що кристали КЦТ одержують із різним типом провідності: при малому вмісті Zn – з провідністю n-типу, а при великому ($x < 0,3$) – p-типу. Відомо, що методом Бріджмена можна одержати кристали n- $Cd_{1-x}Zn_xTe$ з питомим опором до $10^{10}-10^{11}$ Ом·см при загальному надлишку металу у наважці. Оскільки надлишок над стехіометричним складом металу створює власні донори, це повинно було би забезпечувати достатньо низький питомий опір кристалів і тому причина їх високоомності не зрозуміла. Автори роботи [6] пояснюють зміну властивостей кристалів $Cd_{0,8}Zn_{0,2}Te$ різними формами існування фонові домішки кисню, концентрація якої у сполуках $A^{II}B^{VI}$ може досягати 10^{19} см⁻³.

Дослідження механізмів електропровідності на спеціально нелегованих монокристалах $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0,05$), $Cd_{1-x}Mn_xTe$ ($x = 0,04$) і CdTe p-типу провідності проведено в [7, 8]. Зокрема, в роботі [8] досліджено механізм електропровідності монокристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0,05$) з врахуванням глибоких акцепторних домішок (дефектів) декількох типів та їх компенсацію донорами. Визначено енергію та ступінь компенсації акцепторів, відповідальних за електропровідність матеріалу, але водночас не вказується природа домішкових акцепторів.

У даній роботі методом кристалоквазіхімії досліджено дефектну підсистему у твердих розчинах $Cd_{1-x}Zn_xTe$ при наявності у них неконтрольованої домішки кисню.

2. Методика експерименту і результати

Вивчення властивостей проводили на свіжих сколах кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$, вирощених із розплаву по Бріджмену. Заданий режим забезпечував монокристалічний ріст на 2/3 довжини злитку, після чого з різкою зміною властивостей і різкою границею спостерігався перехід до полікристала. Мікроаналіз (МА) для всіх сколів по довжині l і радіусу r злитку давав надлишок металу ($(5-8) \cdot 10^{20}$ см⁻³) над телуром [6]. Оскільки надлишок над стехіометричним складом металу створює власні донори, це повинно було би забезпечувати достатньо низький питомий опір кристалів і тому причина їх високоомності не зрозуміла.

У полікристалічній частині злитку питомий опір становить $10 \div 10^2$ Ом·см. У цьому випадку причину високоомності кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ при надлишку металу у вихідній загрузці, можна пояснити присутністю фонові домішки кисню. Концентрація кисню в усій монокристалічній частині злитку порядку 10^{19} см⁻³ [6]. У міжвузловому положенні кисень O_i є акцептором. Проте збільшення питомого опору по довжині монокристалічної частини злитку не пов'язане з ростом концентрації домішки кисню, так як концентрація $[O_i]$ постійна по усій довжині. Крім того може спостерігатися збіднення загального вмісту кисню у найбільш високоомній частині при зменшенні кількості дефектів Zn_{Cd} у твердому розчині. Це відповідає збільшенню відношення концентрацій $[Cd] / [Zn]$ у високоомній області порядку.

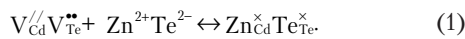
Виміряні спектри катодолюмінесценції [6] на даних злитках по їх довжині показали високу інтенсивність смуг 1200 (1500) нм майже по всій початковій довжині монокристалічної частини злитку, яку пов'язують із вакансіями телуру V_{Te} . Великий надлишок металу у кристалах, який підтверджується даними МА, швидше буде пов'язаний із вакансіями V_{Te} , а не із мілким донором Cd_i. Тоді той факт, що V_{Te} існують при вмісті кисню з концентрацією 10^{19} см⁻³, засвідчує те, що кисень не входить у вузли ґратки, заповнюючи вакансії V_{Te} . У такій формі кисень може вводити при рості кристалів твердих розчинів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ як дефект O_i , який компенсує об'ємну невідповідність електронейтрального центру Zn_{Cd} . У ґратці акцепторний кисень O_i компенсує власні донори, наприклад V_{Te} , причому деяке зменшення концентрації $[V_{Te}]$ у центральній частині злитку, різко збільшує електричний опір. При цьому різко зменшується інтенсивність смуги 1200 (1500) нм (тобто зменшується концентрація $[O]$) і зростає інтенсивність смуги 800 нм. Виявлену смугу 800 нм пов'язують з присутністю кисню у вузлах ґратки O_{Te} [6], інтенсивність якої збільшується у кінці монокристалічної частини.

Дослідження смуги 800 нм у системі CdTe-ZnTe показали, що спектральне розміщення смуги залежить від складу: смуга зміщується у довгохвильову сторону при збільшенні CdTe аналогічно ширині забороненої зони E_g . Велика інтенсивність цього свічення досягається при надлишку кадмію і ще більше різко зростає при високій концентрації O_{Te} у $Cd_{1-x}Zn_xTe$.

3. Розрахунок концентрації точкових дефектів і носіїв струму у Cd_{1-x}Zn_xTe

Розрахунок концентрації точкових дефектів і носіїв струму у твердому розчині Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 0,2) проводили для матеріалу із n-типом провідності, так як досліджуванні кристали по методу Холла характеризуються електронною провідністю, з використанням рівняння (2).

При утворенні твердого розчину заміщення Cd_{1-x}Zn_xTe атоми цинку заміщуючи атоми кадмію у межах області гомогенності утворюють, як відомо, неперервний ряд твердих розчинів. Водночас надлишкові відносно стехіометричного складу як атоми металу так і телуру призводять до утворення власних ТД у кристалічній ґратці Cd_{1-x}Zn_xTe, природу яких можна проаналізувати методом кристалоквазіхімії [9]. Зо]крема утворення твердого розчину за механізмом заміщення А (рівняння 2) проходить шляхом накладання основної матриці кадмій телуриду, яка може бути як n- так і р- типу провідності із легуючим кластером (1). Легуючий кластер для твердих розчинів Cd_{1-x}Zn_xTe одержуємо шляхом накладання антиструктури кадмій телуриду із кристалохімічною формулою цинк телуру:



Відповідно суперпозиція кристалоквазіхімічної формули n-CdTe [9] з (1) призводить до:

$$(1-x) \left[\left(Cd_{(1-a)+ax}^x V_{(1-a)-bx}^{//} \right)_{Cd} \left(Te_{1-a}^x V_{(1-a)-bx}^{••} \right)_{Te} \left(Cd_{(1-a)\alpha}^{••} \right)_i + (2+b)\alpha\epsilon' \right] + x \left(Zn_{Cd}^x Te_x^x \right) \rightarrow \left(Cd_{(1-a)+ax}^x V_{(1-x)\alpha}^{//} V_{((1-a)-b)(1-x)\alpha}^{//} Zn_x^x \right)_{Cd} \times \left(Te_{(1-a)(1-x)+x}^x V_{\alpha(1-x)}^{••} \right)_{Te} \left(Cd_{(1-a)(1-x)\alpha}^{••} \right)_i + (2+b)(1-x)\alpha\epsilon' \quad (2)$$

Результати розрахунків приведені на рис. 1.

Для розрахунку холлівської концентрації електронів для механізму А використовували наступне рівняння електронейтральності одержане із рівняння (2):

$$\alpha(1-x)[V_{Te}^{••}] + (1-a)(1-x)\alpha[Cd_i^{••}] = b\alpha(1-x)[V_{Cd}^{//}] + ((1-a)-b)(1-x)\alpha[V_{Cd}^{//}] + n \quad (3)$$

де n=(2+b)(1-x)αε'.

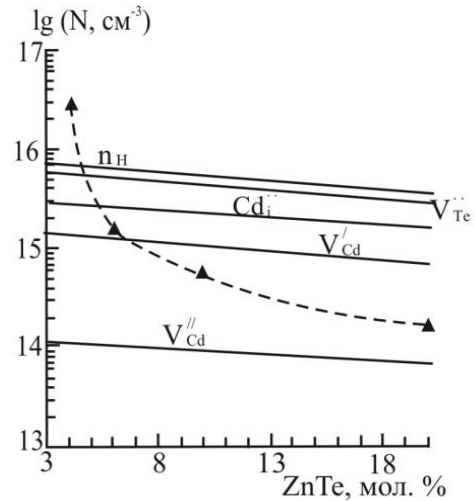
Тоді холлівська концентрація електронів буде визначатися рівнянням:

$$n_H = (1-x)\alpha[V_{Te}^{••}] + (1-a)(1-x)\alpha[Cd_i^{••}] - b(1-x)\alpha[V_{Cd}^{//}] - ((1-a)-b)(1-x)\alpha[V_{Cd}^{//}] \quad (4)$$

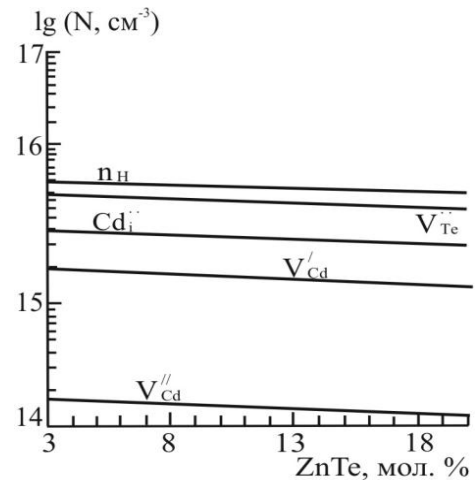
При проведенні розрахунку концентрації точкових дефектів і носіїв струму за рівнянням електронейтральності (2) використовували значення відхилення від стехіометрії атомів кадмію в телуриді кадмію приведені на Т-х діаграмі існування CdTe у роботі [10]. Розрахунок проводили за формулою (4) з врахуванням ефективного заряду біля кожного зарядженого дефекту, який пов'язаний із йонністю зв'язку між атомами (для твердого розчину Cd_{1-x}Zn_xTe приймали йонність зв'язку рівну 18 %).

Як видно із рис. 1 розраховані значення холлівської концентрації носіїв струму n_H і експериментальні мо-

жуть задовільно узгоджуватися при невеликому вмісті ZnTe у твердому розчині Cd_{1-x}Zn_xTe при надстехіометрії кадмію 5,2·10⁻⁵ ат.% (960 К). Домінуючими точковими дефектами n-Cd_{1-x}Zn_xTe є двократно заряджені вакансії телуру і міжвузлові атоми кадмію які є відповідальними за електронну провідність матеріалу. При цьому ефективність аніонних і катіонних вакансій зростає із збільшенням надстехіометрії кадмію у CdTe і зменшується із ростом вмісту ZnTe. Відзначені залежності є характерними для різних значень надстехіометричного кадмію (рис. 1 – а, б).



а

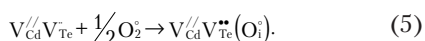


б

Рис. 1. Розраховані значення концентрації дефектів N і холлівської концентрації носіїв струму (n_H) системи n-CdTe-ZnTe (механізм А) при надстехіометрії кадмію α: а – 5,2·10⁻⁵ ат.% (960 К); б – 7·10⁻⁵ ат.% (1150 К); ▲ – експериментальні значення концентрації електронів.

4. Вплив фонові домішки кисню на дефектну підсистему кристалів Cd_{1-x}Zn_xTe

Дослідження впливу фонові домішки кисню на дефектну підсистему проводили також за допомогою методу кристалоквазіхімії. Відповідно до вище приведених досліджень кристалоквазіхімічний склад n-Cd_{1-x}Zn_xTe з домішкою кисню, що описує початок росту кристалів у монокристалічній області злитку, пов'язують із його входженням у міжвузля (механізм В). У кінці росту – домінує заміщення киснем вакансій телуру (механізм А). Легуючий кластер для Cd_{1-x}Zn_xTe із домішкою кисню (δ) буде такий:



Накладання легуючого кластера (5) на кристалоквазіхімічний склад твердого розчину Cd_{1-x}Zn_xTe (2) дає рівняння (6) на початку росту кристалів (монокристалічна частина):

$$(1-\delta) \left[\left(Cd_{((1-\alpha)+\alpha)(1-x)(1-\delta)}^{x} V_{b(1-x)\alpha}^{//} V_{((1-\alpha)+b)(1-x)\alpha}^{//} Zn_{x(1-\delta)}^{x} \right)_{Cd} \left(Te_{(1-\alpha)(1-x)+x}^{x} V_{\alpha(1-x)}^{//} \right)_{Te} \left(Cd_{(1-\alpha)(1-x)\alpha}^{//} \right)_i + (2+b)(1-x)e' \right] + \delta \left[V_{Cd}^{//}V_{Te}^{//}(O_i) \right] \rightarrow \left(Cd_{((1-\alpha)+\alpha)(1-x)(1-\delta)}^{x} Zn_{x(1-\delta)}^{x} V_{b(1-x)\alpha(1-\delta)}^{//} V_{((1-\alpha)+b)(1-x)(1-\delta)+\delta}^{//} \right)_{Cd} \left(Te_{((1-\alpha)(1-x)+x)(1-\delta)}^{x} V_{\alpha(1-x)(1-\delta)+\delta}^{//} O_{i\delta}^{//} \right)_{Te} \left(Cd_{0,5\alpha(1-x)(1-\delta)}^{//} \right)_i + (2+b)(1-x)(1-\delta)e' + 2\delta h^* \tag{6}$$

У кінці росту кристалів монокристалів кристалоквазіхімічний склад твердого розчину буде характеризуватися зміною дефектності матриці (6), з переходом кисню у вакансії телуру:

$$\left(Cd_{(((1-\alpha)+\alpha)(1-x)(1-\delta))}^{x} Zn_{x(1-\delta)}^{x} V_{b(1-x)\alpha(1-\delta)}^{//} V_{((1-\alpha)+b)(1-x)(1-\delta)+\delta}^{//} \right)_{Cd} \left(Te_{((1-\alpha)(1-x)+x)(1-\delta)}^{x} V_{\alpha(1-x)(1-\delta)+\delta}^{//} O_{i\delta}^{//} \right)_{Te} \left(Cd_{(1-\alpha)(1-x)(1-\delta)}^{//} \right)_i + (2+b)(1-x)(1-\delta)e' + 2\delta h^* \rightarrow \leftrightarrow \left(Cd_{(((1-\alpha)+\alpha)(1-x)(1-\delta))}^{x} Zn_{x(1-\delta)}^{x} V_{b(1-x)\alpha(1-\delta)}^{//} V_{((1-\alpha)+b)(1-x)(1-\delta)+\delta}^{//} \right)_{Cd} \left(Te_{((1-\alpha)(1-x)+x)(1-\delta)}^{x} V_{\alpha(1-x)(1-\delta)}^{//} O_{\delta} \right)_{Te} \left(Cd_{(1-\alpha)(1-x)(1-\delta)+\delta}^{//} \right)_{Cd} \tag{7}$$

5. Аналіз результатів

Результати експериментальних досліджень, кристалоквазіхімічні рівняння (2), (6), (7), а також проведені на їх основі розрахунки (рис. 1), підтверджують електронну провідність твердих розчинів Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 0,2). Уточнити, який з механізмів утворення твердого розчину Cd_{1-x}Zn_xTe, що описані кристалоквазіхімічними рівняннями є переважаючим, можна на основі співставлення кристалоквазіхімічних параметрів атомів і кристалічної ґратки Cd_{1-x}Zn_xTe [11], а також експериментальних результатів дослідження залежностей „властивості-склад” і розрахованих значень виду і концентрації дефектів та холлівської концентрації (рис. 1).

Так, зокрема, спостережуване на експерименті зменшення параметра ґратки сфалеритної структури Cd_{1-x}Zn_xTe можна пояснити переважанням заміщення цинком вакансій кадмію у катіонній підґратці (механізм А). Це повністю можливо, так як йоний радіус Zn⁺² складає r_{Zn} = 0,088, що значно менше від йонного радіуса кадмію (r_{Cd} = 0,099 нм). Крім того зменшення параметра ґратки повинно спостерігатися і за кри-

терієм співвідношення ковалентних радіусів кадмію (r_{Cd}=0,148 нм), і цинку (r_{Zn} = 0,125 нм) [11].

При цьому одержують матеріал Cd_{1-x}Zn_xTe із електронною провідністю, що підтверджується результатами розрахунків як для n-Cd_{1-x}Zn_xTe одержаного за механізмом А, так і для n-Cd_{1-x}Zn_xTe – за механізмом В. Так, зокрема, при утворенні твердого розчину Cd_{1-x}Zn_xTe має місце зменшення як концентрації вільних електронів, так і холлівської концентрації (рис. 1) із ростом складу, концентраційна межа якої задовільно узгоджується із експериментальними даними (рис. 1 – а) при не стехіометрії металу 5,2·10⁻⁵ ат. % (960 К).

Утворення твердого розчину n-Cd_{1-x}Zn_xTe за механізмом В також цілком можливе внаслідок узгодженості розміщення йонів цинку (r_{Zn} = 0,088 нм) у незайняті тетраедричні або октаедричні порожнини оточення телуру (r_T = 0,0475 – 0,1055 нм; r_O = 0,0874 – 0,1544 нм) розміри яких є співрозмірними. Водночас утворення міжвузлових атомів мало би привести до зростання параметра ґратки, що не спостерігається на експерименті.

Не виключеним є у даних матеріалах присутність фонові домішки кисню, яка великою мірою впливає на властивості кристалів n-Cd_{1-x}Zn_xTe досліджені у роботі [6]. Одержані кристалоквазіхімічні рівняння n-Cd_{1-x}Zn_xTe із домішкою

кисню (6), (7) підтверджують зроблені вище припущення про зміну типу дефектності у кінці монокристалічної зони росту злитку із переходом кисню у вузли ґратки O_i → O_{Te} із заповненням V_{Te}. Надлишок металу при такому заповненні у кристалі буде визначатися дефектами Cd_i, і основною причиною зміни типу дефектного переходу O_i → O_{Te} є зменшення кількості центрів Zn_{Cd}, які спочатку утримували кисень у міжвузлях, а також накопичення кадмію у розплаві. Опір злитку різко падає, коли зникають акцептори O_i з концентрацією 10¹⁹ см⁻³ і переходом кисню у вузли ґратки, внаслідок чого виникають мілкі власні донори Cd_i замість V_{Te}. При цьому ріст монокристалів n-Cd_{1-x}Zn_xTe із надлишком металу більше або порядку 6 · 10²⁰ см⁻³ з високим питомим опором до 10¹⁰ Ом·см пов'язаний з компенсацією власних донорів міжвузловим киснем з концентрацією [O_i] порядку 10¹⁹ см⁻³. Розміщення йонів O²⁻ із радіусом r = 0,132 нм найбільш імовірно буде проходить в октаедричні порожнини оточення телуру, і на провідністі акцепторні центри O_i['], O_{Te}['] у рівняннях (6), (7) впливати не будуть вна

слідок їх компенсації із власними дефектами сфалеритної ґратки Cd_{1-x}Zn_xTe.

6. Висновки

На основі запропонованих кристалоквазіхімічних моделей утворення твердих розчинів n-Cd_{1-x}Zn_xTe (0,0 ≤ x ≤ 0,2) встановлено, що домінуюча роль вакансій телуру V_{Te}²⁺, які є відповідальними за електронну

провідність матеріалу, узгоджується із експериментальними результатами вимірювання концентрації електронів при надстехіометрії металу.

Проаналізовано кристалохімічні моделі процесів дефектоутворення у злитках твердих розчинів $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, вирощених методом Бріджмена, з участю кисню. Показано, що фонова домішка кисню знаходиться як у вигляді міжвузлового оксигену O_i^{2-} так і займає вакансії телуру $\text{O}_i \rightarrow \text{O}_{\text{Te}}$.

Література

1. Белогорохов, А. И. Оптические свойства монокристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 < x < 0.1$) в инфракрасном диапазоне длин волн [Текст] / А. И. Белогорохов, В. М. Лакеенков, Л. И. Белогорохова // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 7. – С. 808–811.
2. Marbeuf, A. Thermodynamic Analysis of Zn-Cd-Te. Zn-Hg-Te: Phase Separation in $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ and in $\text{Zn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [Tex] / A. Marbeuf, R. Druilhe, R. Tribollet // J. Cryst. Growth. – 1992. – V. 117, №1 – P. 10–15.
3. Атрощенко, Л. В. Термодинамические параметры взаимодействия в системе $\text{CdTe-ZnTe-O}_2\text{-C}$ при выращивании кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ из расплава [Текст] / Л. В. Атрощенко, С. Н. Галкин, Л. П. Гальчинецкий, И. А. Рыбалка, В. Д. Рыжков // Неорганические материалы. – 2003. – Т. 39, №3. – С. 293–297.
4. Белогорохов, А. И. К вопросу о поглощении инфракрасного излучения свободными носителями заряда в $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ [Текст] / А. И. Белогорохов, Л. И. Белогорохов, А. Г. Белов, В. М. Лакеенков, Н. А. Смирнова // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 5. – С. 549–552.
5. Пикус, Г. Я. Динамика испарения в вакууме твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$ [Текст] / Г. Я. Пикус, Ю. В. Калиниченко, Н. И. Рудченко // Неорганические материалы. – 1992. – Т. 29, №4. – С. 752–758.
6. Морозова, Н. К. Зависимость свойств кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ от типа собственных точечных дефектов и форм присутствия кислорода [Текст] / Н. К. Морозова, И. А. Каретников, В. В. Блинов, В. К. Комарь, В. Г. Галстян, В. С. Зимгорский // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 5. – С. 569–573.
7. Kosyachenko, L. A. Compensated impurity conductivity of single crystals $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ [Tex] / L. A. Kosyachenko, Z. I. Zakharuk, A. V. Markov, O. L. Maslyanchuk, I. M. Rarenko, V. M. Sklyarchuk // Ukr. J. Phys. – 2004. – V. 49, №6. – P. 573–578.
8. Косяченко, Л. А. Особенности электропроводности монокристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ и $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ [Текст] / Л. А. Косяченко, А. В. Марков, Е. Л. Масляничук, И. М. Раренко, В. М. Складчук // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, № 12. – С. 1420–1426.
9. Межиловська, Л. Й. Кристалоквазіхімія атомних дефектів твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ з участю кисню [Текст] / Л. Й. Межиловська, А. М. Дмитрів, П. В. Жуковські // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т. 5, № 2. – С. 325–329.
10. Матвеев, О. А. Самокомпенсация в $\text{CdTe}<\text{Cl}>$ в условиях фазового равновесия кристалл–пар кадмия (теллура) [Текст] / О. А. Матвеев, А. И. Терентьев // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, №2. – С. 159–163.
11. Семилетов, С. А. Тетраэдрические и октаэдрические ковалентные радиусы [Текст] / С. А. Семилетов // Кристаллография. – 1976. – Т. 21, №4. – С. 752–758.