НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР
імені Б. І. Вєркіна

МИСЬКО-КРУТІК Наталія Сергіївна

УДК 538.911

СТРУКТУРА ТА МОРФОЛОГІЯ БІНАРНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ Ar, Kr, N_2, CH_4

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі теплових властивостей і структури твердих тіл та наносистем Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Вєркіна Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Солодовнік Ангеліна Олександрівна,
Фізико-технічний інститут низьких температур
імені Б.І. Вєркіна НАН України,
старший науковий співробітник відділу теплових
властивостей і структури твердих тіл та
наносистем.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Бойко Юрій Іванович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна МОН України,
заступник завідуючого кафедри фізики кристалів;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Сорокін Олександр Васильович,
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,
заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться «27» серпня 2020 року о 15^{00} годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б.І. Вєркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Фізико-технічному інституті низьких температур імені Б.І. Вєркіна НАН України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки, 47.

Автореферат розісланий «17» липня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03,
кандидат фізико-математичних наук Юзефович О. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З фундаментальної точки зору кріокристали займають важливе місце в фізиці твердого тіла. Це речовини, які при нормальних умовах знаходяться в газоподібному стані, а в області низьких температур реалізується їх перехід в тверду фазу. “Відносна” простота кріокристалів дозволяє використовувати ці речовини для перевірки різних теоретичних моделей і розрахунків.

Низькотемпературні технології займають важливе значення в розвитку космічних, воєнних та мирних галузей. Розвиток сучасних наукоємних виробництв часто оснований на використанні результатів кріокристалічних досліджень. Це можуть бути кріогенні системи для тонкого розділення газових сумішей, системи кріогенно-вакуумної відкачки, науково-технічного обладнання, лінії по переробці сировини та інше.

Широко досліджуваними серед кріокристалів є затвердівші інертні гази, такі як криптон, аргон, ксенон та інші. Криптон має досить широку сферу використання: робоче тіло для електроракетних двигунів, виробництво надпотужних ексимерних лазерів, теплоізолятор та шумоізолятор в склопакетах, в якості ракетного палива. Аргон використовують для підвищення звукоізоляції та зменшення теплопровідності. Пучки іонізаційних кластерів аргону - це новий спосіб обробки поверхонь до атомної гладкості. Аргону в космосі більше, ніж інших елементів, які широко розповсюджені на землі, тому астрофізичні дослідження потребують знань його структурних характеристик.

В останні десятиріччя, важливим напрямком роботи в умовах космосу є дослідження всесвіту з використанням космічних оптичних лабораторій. На Юпітері, Сатурні та Тритоні, супутнику Плутона, метан знаходиться в конденсованому стані. Озеро рідкого метану та етану знайдено на Титані. Зростає інтерес до використання твердого метану як модератору імпульсних джерел холодних нейтронів, тому що це найкращий модераторний матеріал відомий до цих пір. Проектування кріогенного нейтронного модератору, що має високі охолоджуючі потужності - складне інженерне завдання, яке вимагає широкого знання термодинаміки і структурних параметрів твердого метану.

Інтерес до досліджень твердого азоту та його сплавів зріс після відкриття полімерного азоту. При переході від полімерного до молекулярного азоту виділяється енергія, що робить його перспективним матеріалом для вирішення енергетичних проблем. Плівки твердого N_2 використовуються як модератори, джерела азотної плазми та як матриці в радіаційній фізиці.

Наявність домішків в ґратці простих молекулярних кристалів призводить до значних змін фізичних властивостей зразків. Домішкові ефекти в кріокристалах обумовлені значними відмінностями мас або симетрією молекул, які призводять до зміни властивостей кристалу та нетипової його поведінки, зміни теплофізичних характеристик. Достовірність аналізу ефектів, що спостерігаються, в значній мірі визначається наявністю

даних про утворення нових фаз в твердих сплавах та про граничну розчинність домішок в досліджуваних кристалах. Дослідження бінарних сплавів молекулярних та атомарних кріокристалів дозволяє дослідити вплив взаємної розчинності на стабільність структур.

Приведені вище потреби різних галузей обумовили розвиток широкомасштабних досліджень в області фізики та хімії низьких температур, як фундаментального, так і прикладного плану. Всі ці задачі потребують знання властивостей сплавів кріокристалів і створення версифікаційної бази широкого кола речовин та їх сплавів.

Таким чином, тема дисертаційної роботи **є актуальною**, як з точки зору фундаментальної сучасної науки, так і прогнозованих перспектив практичних застосувань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, які склали дисертаційну роботу, виконані у відділі теплових властивостей і структури твердих тіл та наносистем Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б.І. Вєркіна НАН України в рамках тематичного плану інституту відповідно до відомчої теми:

- тема "Структура і низькотемпературні фізичні властивості молекулярних кристалів і вуглицевих наносистем" (№ державної реєстрації 0112U002634, термін виконання 2012 - 2016)
- тема "Низькотемпературні властивості насичуваних вуглецевих наносистем, домішкових молекулярних твердих тіл та кріокристалів" (№ державної реєстрації 0117U002293, термін виконання 2017 - 2020)
- тема "Створення та дослідження нових модифікованих графенових наносистем та нанокомпозитів з підвищеними експлуатаційними характеристиками" (№ державної реєстрації 0118U100347, термін виконання 2018 - 2019)

У виконанні роботи по цій темі авторка дисертації брала участь як виконавець - аспірант відділу, а після закінчення як молодший науковий співробітник.

Мета і завдання дослідження. *Метою* дисертаційної роботи є отримання нової інформації про структуру та морфологію сплавів кріокристалів на прикладі Ar - Kr, N_2 - Kr, CH_4 - N_2. Для досягнення мети ставилися та вирішувалися **такі задачі**:

- Розробити та реалізувати методику формування твердих регулярних сплавів Ar - Kr, N_2 - Kr, CH_4 - N_2 при низьких температурах. На основі отриманих експериментальних даних визначити характер фазових діаграм сплавів;
- Провести структурний та повнопрофільний аналіз досліджуваних зразків з використанням вдосконаленої комп'ютерної обробки структурних даних;
- В твердих розчинах на основі молекулярної компоненти дослідити орієнтаційний стан з введенням атомарної та молекулярної домішки;

- Розробити методику, яка дозволяє формувати некласичні сплави на прикладі Ar - Kr та провести детальний аналіз структурних особливостей для подальшого використання, як модельного об’єкту.

Об’єктом дослідження є процеси формування бінарних твердих сплавів у всій області взаємних концентрацій, а також процеси впливу атомарної та молекулярної домішки на орієнтаційне впорядкування в молекулярних матрицях для твердих сплавів азот-криптон та азот-метан.

Предметом дослідження є структурний стан бінарних сплавів аргон-криптон, метан-азот, криптон-азот, в різних концентраційних областях та температурних інтервалах.

Методи дослідження - трансмісійна електронографія з використанням гелієвого кріостату та фотографічної системи реєстрації дифракційних картин, сканування і комп'ютерна обробка отриманих зображень. Завдяки сильній взаємодії електронів з речовиною, електронографічний метод дозволяє досліджувати структуру дуже тонких (товщина сотні і навіть десятки ангстрем) плівок при малих щільностях струму первинного пучка та малому часі реєстрації дифракційної картини. Мала довжина хвилі високоенергетичних електронів дозволяє досліджувати структуру утворень, розмір яких складає 10 - 20 Å, що цінно під час пошуку нових фаз на ранніх стадіях їх формування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Вперше в атомарній системі Ar - Kr виявлено область розпаду в концентраційному інтервалі 50 - 70 мол. % Ar, що є прямим структурним доказом обмеженої розчинності.
2. Вперше в системі $N_2 – Kr$ виявлено двохфазна область ГЦК+ГЩУ в концентраційному інтервалі 58 - 89 мол. % Kr на основі проведеного повнопрофільного аналізу. Досліджено розвпорядковуючий вплив обертально-нейтрального домішку та розміру зерна на стан орієнтаційного порядку та розраховано коефіцієнт орієнтаційного порядку. Отримано нові дані про структурні стани сплаву $N_2 – Kr$ у всьому інтервалі взаємних концентрацій при T < 35,6 К.
3. Вперше досліджена кінетика рекристалізаційних процесів в кріосплавах $N_2 – CH_4$, обумовлених відпалом та встановлено, що в передплавильній області фазової діаграми в інтервалі 25 - 45 мол. % CH_4 формується ГЩУ структура подібна до β - N_2, а для зразків 55 - 75 мол. % CH_4 - ґратка відповідає ГЩУ структурі, яка подібна до ГЩУ CH_4. Отримано нові дані про області існування і формування $N_2 – CH_4$ сплаву.
4. Вперше апробовано кластерну модель для опису концентраційної залежності параметру ґратки слабких атомарно-атомарних (Ar – Kr), атомарно-молекулярних ($N_2 – Kr$) та молекулярно-молекулярних розчинів (CH_4 - N_2).
5. Вперше, отримано наноструктурний Ar – Kr сплав з незвичною морфологією. Доведено, що процес зародкоутворення починається в газовій фазі, що призводить до формування багатофазних зразків аргон-

криптон. Структурні характеристики некласичних сплавів кардинально відрізняються від регулярних твердих розчинів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень, які представлені в дисертаційній роботі, мають фундаментальне значення, оскільки поглиблюють знання про механізми формування бінарних сплавів, зокрема на прикладі атомарно-атомарного, атомарно-молекулярного та молекулярно-молекулярного сплавів. Основні результати дисертаційної роботи отримані вперше і можуть бути використані для вибору оптимальних режимів дослідження розчинів. З прикладної точки зору, отримані результати є важливими, оскільки інформація про формування азотних сплавів може бути використана при створенні полімерного азоту. Дослідження впливу орієнтаційного порядку в системах на основі азоту відкриває нові можливості для визначення і уточнення морфології та фазового складу твердих молекулярних розчинів. Експериментальні результати необхідні для розуміння та трактування динамічних процесів в обертальній підсистемі молекулярних кристалів, виявлення їх зв'язку зі структурою, морфологією та властивостями об'єктів дослідження. Інформація про сформовані структури у всій області взаємних концентрацій є актуальною для астрофізичних досліджень сонячної системи. Отримані дані можна використовувати для моніторингу поверхонь різноманітних елементів космічної апаратури та їх очистки. Результати роботи сприятимуть розвитку теорії формування бінарних сплавів. Розроблена методика отримання нанокристалічного розчину, який може бути використаний як модельний об'єкт для дослідження бінарних наноструктурованих сплавів з заданими властивостями.

Особистий внесок здобувача. Наукові статті [1-5], в яких представлені основні результати дисертаційної роботи, було виконано здобувачем у співавторстві. Постановка задачі здійснювалась науковим керівником Солодовнік А.О. Особистий внесок здобувача полягає у підготовці зразків до вимірів; участі в проведенні експерименту; глибокому аналізу літературних даних; опрацюванні експериментальних даних з використанням програмного забезпечення; підготовці матеріалів доповідей та оприлюдненні їх на міжнародних конференціях, симпозіумах та семінарах. Аналіз результатів і написання статей відбувалися спільно. Автор займалася модернізацією програмних комплексів для вирішення поставлених завдань. В роботах [1,2] автором використано повнопрофільний аналіз, що дозволило за даними інтенсивності дифракційних максимумів визначити області існування розчинів для систем $Ar - Kr$ та $N_2 - Kr$. Автором сформульовано та обґрунтовано висновки та положення розділів дисертації, сумарні висновки та узагальнення. Таким чином, особистий внесок дисертанта є **визначальним.**

Апробація результатів дисертації.

Основні результати досліджень, які викладені в дисертації, були представлені персонально здобувачем на наступних міжнародних наукових конференціях:

- X International Conference for Professionals and Young Scientists «Low Temperature Physic - 2019» (ICPYS – LTP - 2019, 3 – 7 June, 2019, Kharkiv, Ukraine);
- 5th International Conference “Nanotechnologies” (19 - 22 November, 2018, Tbilisi, Georgia);
- 6th International Symposium on "Optics and its Applications" (OPTICS - 2018), (18 - 23 February, 2018, Trento, Italy);
- International conference for students and young researchers (OPTO - 2017) (4 - 8 July, 2017, Warsaw, Poland);
- Міжнародній науково-практична конференція «Нанотехнології та наноматеріали» (NANO - 2016, 24 - 27 серпня 2016, Львів, Україна);
- 11th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals «CC 2016» (18 - 24 August, 2016, Turku, Finland);
- 4th International Symposium «Optics & its Applications» (OPTICS - 2016) (22 - 25 July, 2016, Yerevan – Ashtarak, Armenia);
- XII Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (1 – 4 грудня, 2015, Харків, Україна);
- 10th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals «CC 2014»(August 31 - September 8, 2014, Almaty, Kazakhstan);
- V International Conference for Young Scientists «Low Temperature Physics-2014» (ICYS-LTP-2014, 2–6 June, 2014, Kharkiv, Ukraine);
- IV Международная научная конференция «Наноразмерные системы, свойства, технологии 2013»(НАНСИС 2013, 19 - 22 ноября 2013, Киев, Украина);
- Міжнародна конференція молодих вчених та аспірантів «ІЕФ 2013»(20 - 23 травня 2013, Ужгород, Україна);
- Міжнародна конференція студентів та молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика 2013» (14 - 16 травня, 2013, Львів, Україна).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 18 наукових працях: 5 статей у провідних спеціалізованих наукових журналах [1–5], що індексуються у науко-метричній базі даних Scopus, та 13 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних наукових конференцій [6 – 18].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотацій, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, шести оригінальних розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та одного додатку. Загальний обсяг дисертації складає 147 сторінок, вона містить 52 рисунки, 6 таблиць та список використаних джерел з 186 найменувань на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В **анотаціях** представлено основні результати досліджень, зазначено їх наукову новизну, наведено ключові слова та список публікацій здобувача за темою дисертації.

У **вступі** коротко обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету та основні завдання, об’єкти, предмет і методи досліджень. Сформульована та викладена наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок дисертанта та апробації роботи і публікацій за темою дисертації, а також подано інформацію про структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі «Структура та властивості кріокристалів»** проведено стислий літературний огляд наявної літератури щодо даних досліджуваних бінарних сплавів. Розділ складається з 5 підрозділів.

У **підрозділі 1.1** наведено короткий огляд загальних відомостей про кріокристали, а також надано опис структури і фізичних властивостей компонентів, які розглянуто в дисертаційній роботі.

Підрозділ 1.2 присвячено узагальненню характеристик атомарних (аргону та криптону) та молекулярних (азот та метан) кріокристалів.

У **підрозділі 1.3**. представлено опис теоретичних моделей (правило Вегарда, теорія Пригожина, правило Юм-Розері, теорія Барата), які використовуються для аналізу бінарних сплавів.

Підрозділ 1.4. містить інформацію про дослідження орієнтаційного порядку молекулярних кристалів. Приведено факти, як змінювався порядок в залежності від впливу температури та наявності домішок у твердих розчинах.

У **підрозділі 1.5.** наведено інформацію про Ar - Kr, N_2 - Kr, CH_4 - N_2 сплави, які досліджені раніше різними способами за різних умов. Проведено масштабний аналіз теоретичних робіт по розчинності для бінарних сплавів кріокристалів.

В результаті аналізу літературних даних стала очевидною доцільність дослідження бінарних сплавів у вибраному температурному інтервалі методом трансмісійної електронографії, з використанням вперше повнопрофільного аналізу дифракційних зображень.

У **другому розділі «Методика експерименту та обробки даних»** описано застосовану методику: структурна трансмісійна електронографія (THEED) з використанням гелієвого кріостату. Дослідження проводились на Електронографі ЕГ-100А в інтервалі температур від 5 К до температури сублімації зразків. Для зразків використовувались гази CH_4, N_2, Ar та Kr чистотою 99,98 %. Склад газоподібної суміші відповідав складу твердого кріосплаву. Зразки готувались *”in situ*” конденсацією газової суміші на алюмінієву та вугільну підкладки. Розподіл компонентів суміші, під час формування зразку, був випадковий. В розділі детально описано як відбувалась первинна обробка експериментальних даних, визначалась структура, проводився розрахунок параметру ґратки та вперше для експериментальних даних застосовувався повнопрофільний аналіз. Завдяки фотографічній реєстрації та значно вдосконаленій комп’ютерній обробці даних, були покращені точність та надійність результатів.

У **третьому розділі «Дослідження сплаву Ar-Kr»** представлені результати структурних досліджень атомарно-атомарного сплаву Ar - Kr. Отримано твердий сплав Ar - Kr при температурах конденсації 5 К та 20 К.

Встановлено, що всі дифракційні відображення, по даним міжплощинних відстаней та розподілу інтенсивності дифракційних максимумів, відповідають ГЦК фазі.

Побудовано концентраційну залежність параметру ґратки Ar – Kr. Проведено порівняльний аналіз з правилом Вегарда, теорією Пригожина. та кластерною моделлю. Морфологія слабких розчинів розглянута з використанням концепції кластерів в наближенні випадкового розподілення домішок. Кластерна модель описує концентраційну залежність параметру ґратки в області малих концентрацій (до 15 мол %). В рамках моделі передбачається, що формуються одиничні, парні та трійні кластери. Залежність параметру ґратки розчину від складу розраховується за допомогою виразу [1]:

$$a(x)_{theor} = a(0)\left[1+\square C_{1r}+\square\frac{3C_{2r}}{2}+\square\frac{11(x-C_{1r}-2C_{2r})}{18}\right] \qquad (1)$$

Експериментальні величини добре узгоджуються з розрахунком кластерної моделі (рис. 1).

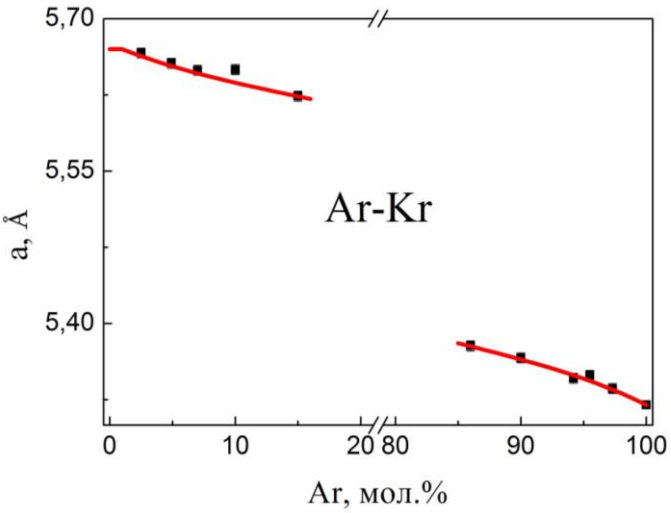

Рис. 1. Параметр ґратки твердих сплавів Ar - Kr як функція концентрації аргону при T_k = 20 K;T_c = 20 K.
Криві – розрахунок відповідно до кластерної моделі,
■ - *експериментальні значення.*

Визначено області існування регулярних розчинів для кріосплаву Ar - Kr на основі аналізу концентраційної залежності параметру ґратки та характеру рекристалізаційних процесів. В інтервалах 0 - 45 мол. % Ar та 75 - 100 мол. %Ar формувався однофазний сплав. Під час його нагріву відбувалось характерне для рекристалізаційних процесів збільшення зерна. В концентраційному інтервалі 50 - 70 мол. % Ar зі збільшенням температури дифракційні лінії загострювались, що свідчило про процес рекристалізації, а при наближенні до температури 30 К спостерігалось сильне їх розмиття. В температурному інтервалі 32 - 35 К електронограми відповідали системам з накладанням двох систем дифракційних максимумів. Одна з яких відповідала криптону, а інша відповідала розчину аргон-криптонового сплаву. Розчин на основі аргону не зафіксовано, в зв’язку з перевищенням температури його сублімації.

Електронограми розчинів, які готувались при температурі 5 К відповідали високодисперсному стану. При досягненні температури 12 К

починався ріст зерен. Найбільш інтенсивно процес рекристалізації відбувався при досягненні 20 К. При подальшому підвищенні температури, єдина система гострих максимумів починала розпливатися та при температурі 32 - 38 К спостерігалися вже 2 фази (рис. 2).

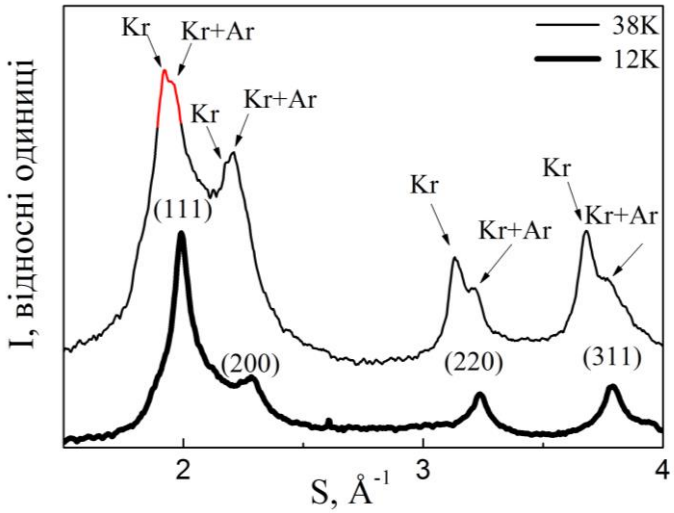

Рис. 2. Дифракційні картини Ar - Kr сплаву, які ілюструють зміну структури низькотемпературних сплавів 60 мол. % Ar в процесі відпалу на вугільній підкладці. T_k = 5 К.
S – вектор дифракції.

Основні результати розділу опубліковано в роботі [2,6,16].

Четвертий розділ «Електронографічне вивчення бінарного сплаву N_2-Kr» присвячено дослідженню атомарно-молекулярній системи. Структури сплавів на основі азоту або криптону відповідали системі ліній кубічної ґратки. Симетрія структури сплавів, з переважним складом молекулярної компоненти, відповідала *Pa3* модифікації, ГЦК ґратка була характерна для сплавів на основі криптону.

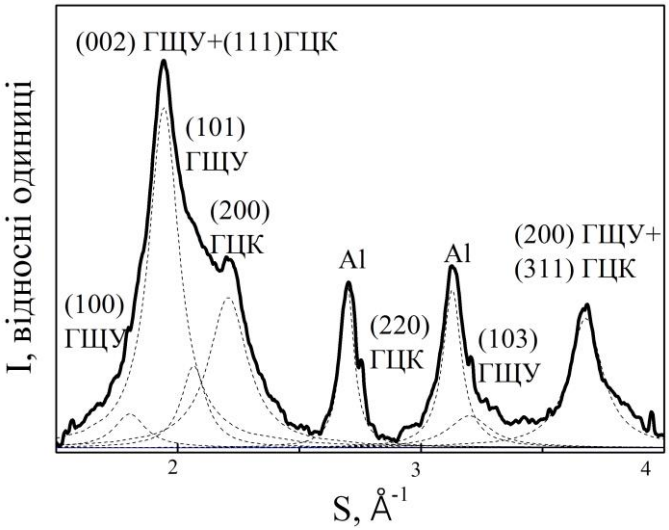

Рис. 3. Дифрактограма сплаву 86 мол % Kr - N_2 на алюмінієвій підкладці при T_k = 20 K;T_c = 20 K.

В концентраційному інтервалі 58 – 89 мол. % Kr зафіксовано співіснування фаз з кубічною (ГЦК) та гексагональною (ГЩУ) ґратками (рис. 3.) в результаті вперше проведеного повнопрофільного аналізу розподілу інтенсивності дифракційних максимумів. Проведені вимірювання відносних інтенсивностей рефлексів ГЩУ (101) і ГЦК (200) ґраток в залежності від

концентрації, які відображають відносну зміну об'ємів гексагональної і кубічної фаз. Максимальний вміст ГЩУ спостерігався при концентрації 89 мол % Kr.

Прораховано та побудовано концентраційну залежність параметру ґратки ГЦК фази для системи N_2 - Kr при T = 20 К у всій області взаємних концентрацій (рис. 4). Встановлено концентраційну область існування рівноважного розчину: криптону в гратці азоту до 20 мол. %; азоту в твердому криптоні до 11 мол. %. У випадку азот-криптонової системи правило Вегарда співпало з теорією Пригожина.

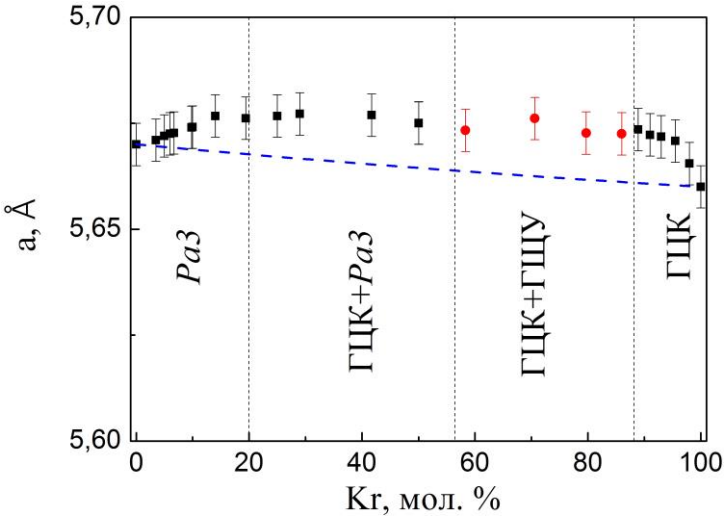

Рис. 4 Концентраційна залежність параметру ґратки твердих сплавів N_2-Kr T_k = 20 K;T_c = 20 K.
■ та ● - експериментальні значення,
пунктирна крива – розрахунок відповідно до правила Вегарда та теорії Пригожина .

Проведено порівняльний аналіз експериментальних даних параметру ґратки з теоретичними підходами (правило Вегарда, теорія Пригожина, кластерна модель). Картина залежності параметру від концентрації в порівнянні з кластерною моделлю асиметрична з різних боків графіку. Зі сторони азоту до 7 мол. % спостерігалось досить різке зростання параметру ґратки, це пов'язано з тим, що саме в цьому діапазоні домінують одиничні кластери та найбільш ефективно впливають на матрицю. Подальше збільшення концентрації криптону призводить до сповільненого зростання параметру ґратки. В азотній матриці кластерна модель коректно описала поведінку до 15 мол. %. Побудована фазова діаграма N_2 - Kr сплаву.

Експериментальні дані параметру ґратки слабких розчинів N_2 - Kr дають можливість розрахувати значення відносних надлишкових об'ємів ($\Delta v/v$), які приходяться на домішки. Вперше було розраховано надлишковий об'єм для досліджуваного сплаву при T = 20 К:

$$\Delta v/v = \lim_{x_n \to 0} \frac{v(x_{N_2}) - v(0)}{x_{N_2} v(0)} = 0{,}13 \qquad (2)$$

на домішок азоту

$$\Delta v/v = \lim_{x_n \to 0} \frac{v(x_{Kr}) - v(0)}{x_{Kr} v(0)} = 0{,}05 \qquad (3)$$

на домішок криптону

На молекулу азоту в ґратці криптону приходиться майже в 2 рази більше об’єму, ніж на атом криптону в молекулярному кристалі. Деформації навколо молекул значніші, що призводить до меншого інтервалу існування розчину в атомарній ґратці в порівнянні з молекулярною.

Дослідження області граничної розчинності компонент було проведено з використанням концентраційної залежності дифрагованої інтенсивності. Молекули азоту являються розсіюючими центрами, які відповідають за формування “надструктурних” відображень. Експериментальні дані свідчили про відносне зменшення інтенсивності “надструктурних” піків на дифракційних картинах по мірі збільшення домішку криптону в сплаві. Проведено співставлення розрахункових значень інтенсивності, в припущенні збереження орієнтаційного впорядкування молекул азоту, з експериментальними. Використано розрахунок співвідношення експериментальної інтенсивності “надструктурного” максимуму (321) до регулярного (311), яке нормовано на таке ж відношення в чистому азоті при температурі 20 К та 5 К (рис. 5).

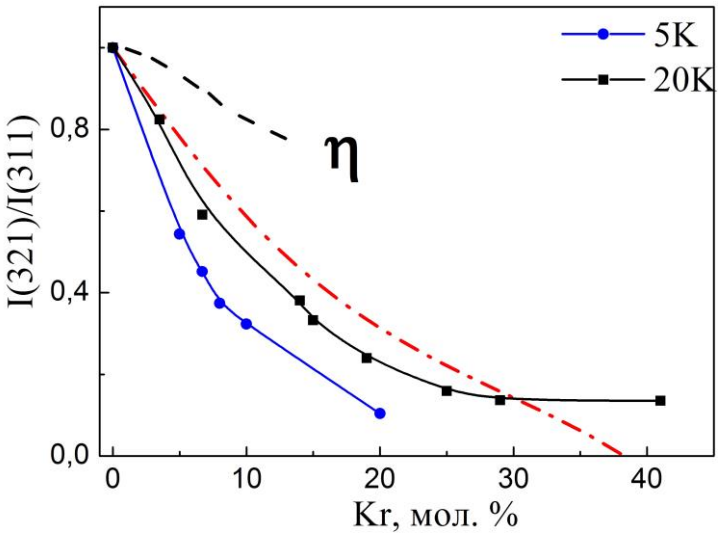

Рис. 5. Нормована інтенсивність надструктурного піку (321) при $T_к$ = 5K, T_c = 5K (●) і T_c=20K (■) - значення коефіцієнту орієнтаційного порядку в залежності від концентрації Kr. штрих-пунктирна крива – розрахунок нормованої інтенсивності піку (321) для орієнтаційно впорядкованих сплавів; пунктирна крива - коефіцієнт орієнтаційного порядку

При 20 К в концентраційному інтервалі до 20 мол. % Kr співвідношення I (321) /I (311) зменшується та розчин формується. В області 20 – 25 мол. % Kr експериментальні значення починають наближатись до розрахункових, що можна пояснити початком зміни морфології зразків, тобто починають випадати фази у вигляді мілкодисперсної фракції, кожний кристаліт якої не в змозі сформувати когерентні рефлекси. Відсутність залежності інтенсивності від складу вказує на розшарування розчину в сплавах з концентрацією більше 25 мол. % Kr. Пояснити відхилення експериментальної кривої від розрахункової можна, якщо прийняти до уваги процес розвпорядкування молекул азоту в розчині. Введення атомного домішку в ґратку молекулярного кристалу призводить до послаблення анізотропних сил.

Розраховано значення коефіцієнта орієнтаційного порядку (η) по формулі:

$$\eta = 1 - \frac{\tilde{I}_{321}^{calc} - \tilde{I}_{321}^{\exp}}{\tilde{I}_{321}^{calc}} \qquad (4)$$

де $\tilde{I}_{321}^{calc}$ розрахункове значення нормованої інтенсивності = $\frac{I_{321}^{calc}(x)}{I_{321}^{calc}(0)}$;

$\tilde{I}_{321}^{\exp}$ - нормована експериментальна інтенсивність = $\frac{I_{321}^{\exp}(x)}{I_{321}^{\exp}(0)}$

Зі зміною концентрації, значення коефіцієнту орієнтаційного порядку починає повільно зменшуватись. Мінімальне значення реалізовано в розчинах граничної концентрації 20 мол. % N_2 .

Значення експериментальної нормованої інтенсивності на рис. 5 при 5 К (●) відхилені в бік менших величин в порівнянні з кривою для високотемпературних сплавів (■). Цей факт обумовлений тим, що до розвпорядкованого впливу обертально-нейтрального домішку додано вплив розміру зерна (при низьких температурах розмір зерна малий).

Основні результати розділу опубліковано в роботах [1,5,6,7,16,17,18].

П'ятий розділ «Структурні особливості сплаву N_2-CH_4» присвячено дослідженням твердого сплаву, що складався з двох молекулярних компонент метану та азоту при температурі 19 К. Дифрактограми зразків N_2 – CH_4 з малим домішком метану відповідали *Pa3* модифікації. Сплави на основі метану формували ГЦК структуру.

Побудована концентраційна залежність параметру ґратки для визначення областей формування розчину (рис. 6). В інтервалі 0 - 5 мол % домішку значення змінювались, відповідно до правила Вегарда, з обох боків концентраційної залежності.

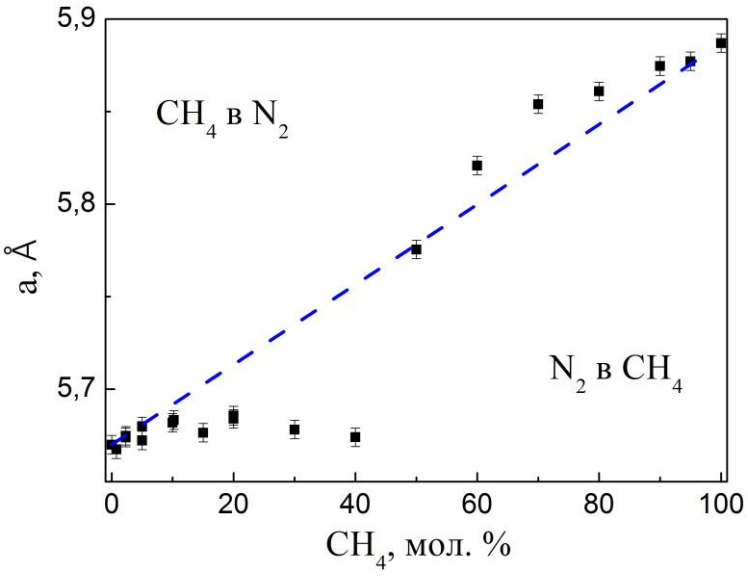

Рис. 6. Концентраційна залежність параметру ґратки твердих сплавів $N_2 – CH_4$ при T_k = 19 K; T_c = 19 K.
■ - *експериментальні значення, пунктирна пряма - разрахунок відповідно до правила Вегарда.*

В концентраційній області 6 - 20 мол. % CH_4 параметр ґратки *a* майже не змінювався та дорівнював значенню 5,682 ± 0,005 Å. Розчинність метану в

матриці азоту складає 6 мол. %. Область 6 - 20 мол. % CH_4 є інтервалом розпаду, в якому домішки випадають у вигляді дрібнодисперсної фази. Зі збільшенням концентрації в 20 - 40 мол. % CH_4 електронограми відповідали кубічній ґратці зі слідами *Pa3*. В метановій матриці збільшення домішку азоту не призводило до появи додаткових фаз і до 35 мол. % N_2 формувався стабільний розчин.

Морфологія зразків в концентраційному інтервалі до 15 мол. %, в наближенні випадково розподілених домішок, вперше розглядалась з використанням кластерної моделі, яка коректно описала поведінку азоту в матриці метану до 15 мол. %. В азотній матриці кластерна модель описала параметри ґратки в концентраційному інтервалі до 6 мол. % метану.

Вперше проведено повнопрофільний аналіз дифрагованої інтенсивності електронограм сплаву CH_4 - N_2. Введення в ґратку низькотемпературної фази азоту орієнтаційно нейтральних частинок метану призводить до локального порушення симетрії та зменшення анізотропних сил. Заміна молекул азоту молекулами метану викликала послаблення інтенсивності “надструктурних” відображень. Аналогічно з попереднім розділом проведено розрахунки нормованої інтенсивності піків I (321) / I (311) Пунктирною лінією на графіку (рис. 7) позначено величину I (321) / I (311), яка розрахована для випадку зменшення кількості розсіюючи центрів, що відповідало за формування “надструктурних” піків без зміни орієнтаційного порядку.

Відповідно до рис. 7, при концентрації до 6 мол. % метану, експериментальні дані знаходяться нижче розрахункових. В області більше 6 мол. % метану дані не залежать від концентрації, що є ознакою розпаду розчину. Розрахунки підтверджують, що розчин формується при концентрації до 6 мол. %. Побудовано залежність коефіцієнту орієнтаційного порядку від концентрації (рис. 7).

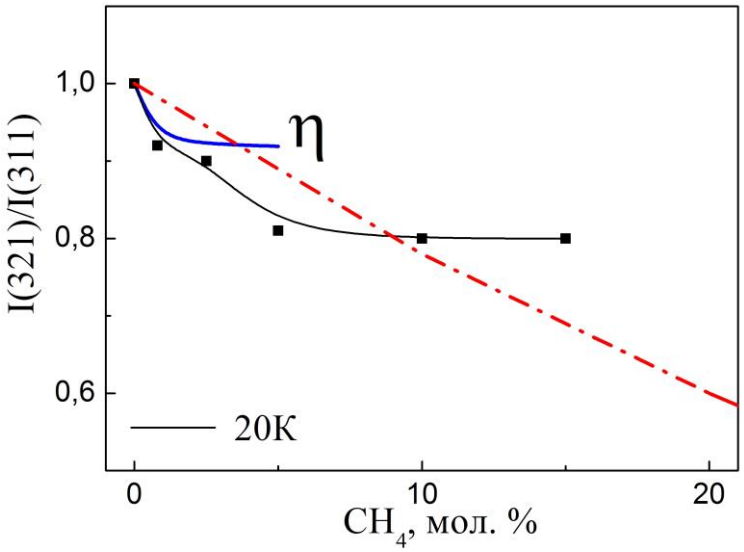

Рис. 7. Нормована інтенсивність надструктурного піку (321) та коефіцієнту орієнтаційного порядку (η) в залежності від концентрації метану T_k = 19 K;T_c = 19 K

■ – експериментальні значення,

штрих-пунктирна крива – розрахунок нормованої інтенсивності піку (321) для орієнтаційно впорядкованих розчинів.

Досліджено сплави N_2 - CH_4 при $T_к$=5 К. Властивістю нерівноважних систем є перехід в рівноважний стан через проміжні метастабільні стани.

Характер дифракційної картини при відпалі відповідає однофазному сплаву в інтервалах 0-20 мол % та 80 - 100 мол % метану в азоті. В зразках концентрацією 25 - 50 мол % метану в азоті формувалась нерівноважна аморфна фаза, яка під час нагріву переходила в розчин з β - N_2 ґраткою. В інтервалі 55 - 75 мол % CH_4 було експериментально отримано аморфний стан, нагрів зразків до температури 10 К призводив до незворотніх перетворень в однофазний розчин з ГЩУ структурою метану. Даний перехід відбувався досить швидко (рис. 8).

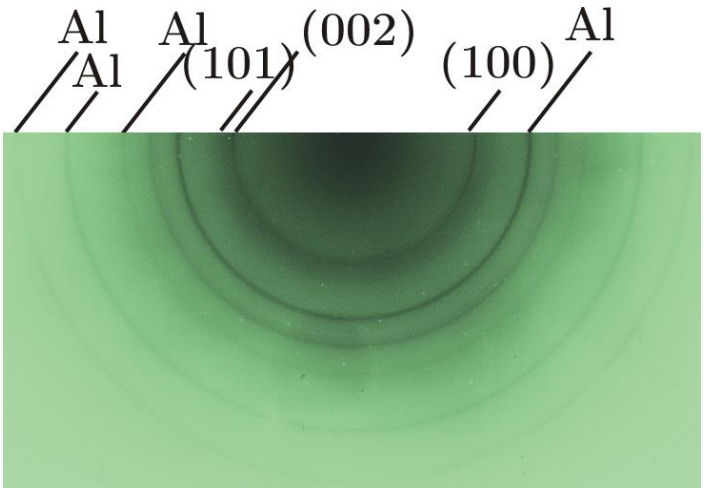

Рис. 8. Электронограма сплаву 28,6 мол % $N_2 – CH_4$ при T_k = 5 K;T_c = 12 K. Параметри ГЩУ фази c = 6,734 Å, a = 4,115 Å, c/a = 1,636.

В предплавильному інтервалі фазової діаграми, для концентраційної області 25 - 45 мол % CH_4, сплав метан-азот формує ГЩУ структуру подібну до β - N_2, а для зразків с концентрацією метану 55 - 75 мол % - ґратка відповідає ГЩУ структурі, яка подібна до ГЩУ CH_4.

Основні результати розділу опубліковано в роботах [3,5,6,8,9,10,11,12].

У шостому розділі «Особливості структурних станів нанокристалічних сплавів аргон-криптон» викладена інформація стосовно вперше отриманого нанодисперсного Ar - Kr розчину. Розроблена методика приготування зразків: газову суміш подавали по капіляру, який охолоджено до азотної температури, а осадження переохолодженої газової суміші відбувалось при температурі 6 К або 20 К.

При температурі осадження та проведенні зйомки сплаву 6 К на алюмінієвій та вугільній підкладках спостерігались слабо текстуровані зразки (рис. 9.). Встановлено, що сплави поліфазні та складаються з ГЦК та ГЩУ фаз аргону та досить інтенсивного гало при малих кутах дифракції.

Для пояснення факту, що процес зародкоутворення починається в переохолодженій газовій фазі було приготовано «сендвіч». Переохолоджений аргон сконденсовано, а потім на нього подано криптон, що призвело до формування двох ГЦК фаз: чистого аргону та криптону. Також аналогічним способом було приготовано зразок чистого аргону. Електронограма якого відповідала ГЦК фазі аргону.

Для з’ясування поведінки гало при збільшенні температури багатофазні зразки нагрівалися до температури 40 К, що призводило до звуження ореолу, а також формування ліній (111) і (311) чистого криптону у вигляді слабких

ГЦК-віддзеркалень. Рекристалізаційна поведінка була ідентична, як для низькотемпературних зразків ($T_к$ = 6 К), так і високотемпературних ($T_к$ =20 К.).

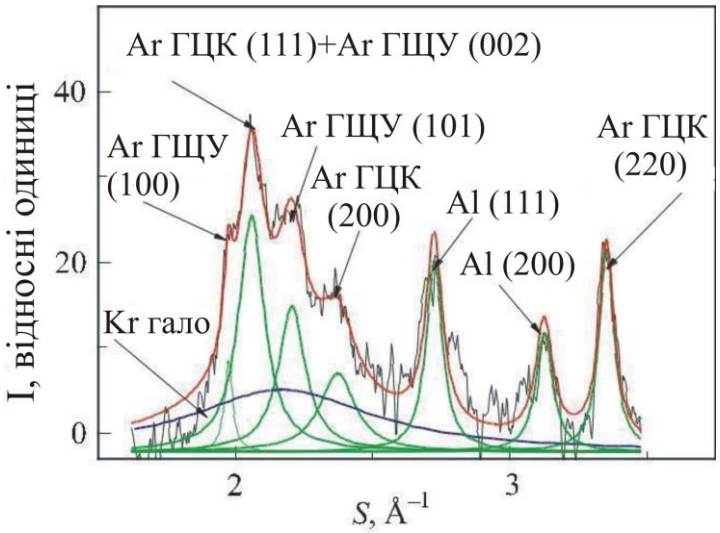

Рис. 9. Дифрактограма еквімолярної переохолодженої газової суміші Ar - Kr при $T_к$ = 6 К, $T_с$ = 6 К на алюмінієвій підкладці.

На рис. 10. об'єднано всі проведені дослідження нанокристалічного сплаву при різних температурах та показано, як гало змінюється з підвищенням температури.

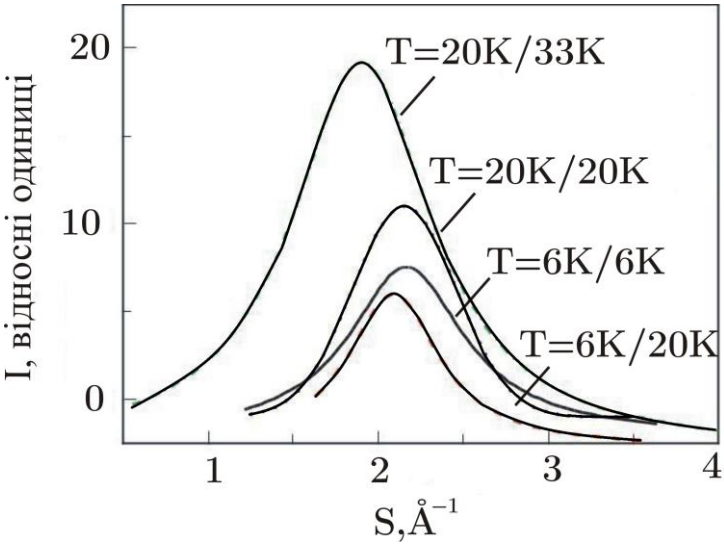

Рис. 10. Зміна криптонового гало під час нагрівання, еквімолярної переохолодженої газової суміші Ar - Kr.

Температура приготування практично не впливала на положення і ширину ореолу. Після видалення аргону шляхом нагрівання до 33 К, центр ореолу (найвища крива) перемістився з положення S = 2,16 $Å^{-1}$ до S =1,97$Å^{-1}$, тобто близько до значення піку ГЦК (111) від чистого криптону. Криптон формує гало. Така морфологія характерна для дисперсійно міцних сплавів. Утворення рідкоподібного стану спільно з кристалічними ГЦУ та ГЦК модифікаціями було зафіксовано у вільних великих кластерах аргону, які допійовані криптоном. Дослідження наноструктурних сплавів є перспективними, що пов'язано з можливістю отримання унікальних властивостей (міцність, структура, нові фізичні характеристики) в реальних експлуатаційних умовах.

Основні результати розділу опубліковано в роботі [4,13,14,15].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі узагальнено нові експериментальні результати структурних досліджень твердих атомарно-атомарного (Ar - Kr), атомарно-молекулярного (N_2 - Kr) та молекулярно-молекулярного (CH_4 - N_2) сплавів у всій області взаємних концентрацій.

Достовірність результатів забезпечувалась апробованим для фізики твердого тіла експериментальним методом, обробкою експерименту завдяки відомим теоретичним підходам, коректним врахуванням похибок вимірювань, відповідністю до результатів інших авторів. Теоретичний аналіз даних було проведено в рамках сучасної концепції фізики твердого тіла.

На завершення хотілося б відмітити положення, які слідують з узагальнення проміжних висновків, відповідають актуальності теми та були вперше отримані в даній роботі:

1. Вперше в Ar – Kr кріосплавах виявили і дослідили область розпаду в концентраційному інтервалі 50 - 70 мол % Ar, що є прямим структурним доказом обмеженої розчинності.
2. Вперше в системі N_2 – Kr виявлено двохфазна область ГЦК + ГЩУ в концентраційному інтервалі 58 - 89 мол. % Kr на основі проведеного повнопрофільного аналізу. Досліджено розвпорядковуючий вплив обертально-нейтрального домішку та розміру зерна на стан орієнтаційного порядку та розраховано коефіцієнт орієнтаційного порядку. Отримано нові дані про структурні стани сплаву N_2 – Kr у всьому інтервалі взаємних концентрацій при T < 35,6 К.
3. Вперше досліджена кінетика рекристалізаційних процесів в кріосплавах N_2 – CH_4, обумовлених відпалом. Встановлено, що в передплавильній області фазової діаграми в інтервалі 25 - 45 мол. % CH_4 формується ГЩУ структуру подібну до β - N_2, а для зразків 55 - 75 мол. % CH_4 - ґратка відповідає ГЩУ структурі, яка подібна до ГЩУ CH_4. Отримано нові дані про області існування і формування N_2 – CH_4 сплаву.
4. Апробація кластерної моделі показала, що вона коректно описує концентраційну залежність параметру ґратки слабких атомарно-атомарних (Ar – Kr), атомарно-молекулярних (N_2 – Kr) та молекулярно-молекулярних (CH_4 - N_2) розчинів.
5. Вперше розроблено методику формування нанокристалічного сплаву Ar – Kr з незвичною морфологією. Структура зразків була поліфазна та складалась з ГЦК фази аргону, ГЩУ формацій аргону, а також аморфної фази криптону. Доведено, що зниження температури газової суміші сприяє зародкоутворенню в газовому потоці.

Разом з тим, в дисертаційній роботі спрогнозовано нові напрямки досліджень та наведено слабо досліджувані питання, пов’язані з впливом домішок на коефіцієнт орієнтаційного порядку, відсутність теоретичних робіт, які коректно можуть описувати поведінку нових форм сплавів. В якості нових задач є дослідження впливу домішок на орієнтаційний порядок

в молекулярних матрицях не симетричних молекул. Дані дослідження актуальні і дисертаційна робота є початком циклу експериментів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Структурные превращения в сплавах N_2 – Kr. / **А.А. Солодовник, Н.С. Мисько-Крутик** // Физика Низких Температур: Том 45, Выпуск 12 (Декабрь 2019), с. 1531-1537.
2. Структура и свойства твердых растворов Ar – Kr. / А.А. Солодовник, **Н.С. Мисько-Крутик** // Физика Низких Температур: Том 45, Выпуск 5 (Май 2019), с. 637-643
3. Структура криосплавов N_2–CH_4. / А.А. Солодовник, **Н.С. Мисько-Крутик,** М.И. Багацкий // Физика Низких Температур: Том 43, Выпуск 12 (Декабрь 2017), с. 1754-1760
4. Unusual morphology of equimolar Ar-Kr alloys. / V.V. Danchuk, A.A. Solodovnik, **N.S. Mysko**, and M.A. Strzhemechny // Low Temp. Phys., vol. 41, no. 6, (2015) P. 546-551.
5. Cluster approach to formation of nitrogen–rare gas cryoalloys. / A.A. Solodovnik, V.V. Danchuk, and **N.S. Mysko** // Low Temp. Phys., vol. 39, no. 5, (2013) P. 586-590.
6. **N. S. Mysko-Krutik**, A. A. Solodovnik, ”STRUCTURAL STUDIES OF CH_4-N_2, N_2-Kr, Ar-Kr CRYOALLOYS*” in Book of Abstracts 10th Int. Conf. for Young Scientists & Professionals “Low Temperature Physics”*, 2019, Kharkiv, Ukraine, p. 91.
7. **N. S. Mysko-Krutik**, A. A. Solodovnik, ”Orientational order in N_2-Kr condensed films” in *Book of Abstracts 5th International Conference “Nanotechnologies”*, 2018, Tbilisi, Georgia, p. 138.
8. **N. S. Mysko-Krutik**, A. A. Solodovnik, ”The orientational order and morphology of N_2-CH_4 solid solutions. Cluster approach.” *in Book of Abstracts 6th International Symposium “Optics &its Applications” (OPTICS – 2018),* Trento, Italy, p. 46.
9. **N. S. Mysko-Krutik**, A. A. Solodovnik, ”Structural study of solid CH_4 doped N_2.” *in Book of Abstracts OPTO 2017*, Warsaw, Poland, p. 61
10. **N.S. Mysko**, A.A. Solodovnik, “Structural study of N_2-CH_4 alloys. Cluster model.” in *Book of Abstracts“Nanotechnology and Nanomaterials” (NANO-2016)",* Lviv, Ukraine, p. 399.
11. **N.S. Mysko**, A.A. Solodovnik, “STRUCTURE OF SOLID α – NITROGEN DOPED METHANE” in *Book of Abstracts 11 Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals "CC-2016"*, Turku, Finland, p. 70.
12. **N.S. Mysko**, A.A. Solodovnik, “Electron diffraction studies of solid mixtures CH_4 – N_2” *in Book of Abstracts 4th International Symposium “Optics &its Applications” (OPTICS – 2016),* Yerevan – Ashtarak, Armenia, p. 123.
13. **N.S. Mysko**, A.A. Solodovnik, M.A. Strzhemechny, “ The structure and morphology of the equimolar alloy Ar – Kr.” *в Матеріали XII Міжн. наук. конф. «Фізичні явища в твердих тілах»,* 2015, Харків, Україна, с. 26.

14. V.V. Danchuk, **N.S. Mysko**, A.A. Solodovnik, M.A. Strzhemechny “THEED STUDY OF Ar – Kr EQUIMOLAR ALLOY MORPHOLOGY” *in Book of Abstracts 10 Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals "CC-2014",* Almaty, Kazakhstan, p. 60.
15. **N.S. Mysko**, V.V. Danchuk, A.A. Solodovnik, M.A. Strzhemechny «STRUCTURAL STUDY OF THE FORMATION OF BINARY CRYOALLOYS” *in Book of Abstracts 5th Int. Conf. for Young Scientists “Low Temperature Physics”,* 2014, Kharkiv, Ukraine, p. 123.
16. **Н.С. Мисько,** В.В. Данчук, А.А. Солодовнік, “Кластерна модель розчинів молекулярних кристалів з інертними газами” *в Матеріали Міжн. наук. конф. "НАНСИС - 2013",* Київ, Україна, с. 146.
17. **Н.С. Мисько,** В.В. Данчук, А.А. Солодовнік, “ЕЛЕКТРОНОГРАФІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БІНАРНИХ КРІОСПЛАВІВ АЗОТ – ІНЕРТНІ ГАЗИ.” *in Book of Abstracts Int. Conf. of Young Scientists and Post-Graduates IEP-2013,* Uzhhorod, Ukraine, p. 152.
18. **Н.С. Мисько,** В.В. Данчук, А.А. Солодовнік, “СТРУКТУРА СЛАБКИХ БІНАРНИХ РОЗЧИНІВ КРІОКРИСТАЛІВ АЗОТ – ІНЕРТНІ ГАЗИ. КЛАСТЕРНА МОДЕЛЬ” in Book of Abstracts Int. Conf. of Student and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics HEUREKA-2013, Lviv, Ukraine, p. A19.

АНОТАЦІЯ

Мисько-Крутік Н.С. Структура та морфологія бінарних сплавів на основі Ar, Kr, N_2, CH_4. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. І. Вєркіна НАН України, Харків, 2020.

В дисертаційній роботі представлено результати структурних електронографічних досліджень бінарних сплавів Ar - Kr, N_2 - Kr та N_2 - CH_4 у всій області взаємних концентрацій.

Визначено прямі структурні докази обмеженої розчинності в атомарній макросистемі Ar – Kr. Експериментально виявлено для N_2 - Kr сплаву дві двохфазні області. Було з’ясовано вплив домішку (криптон або метан) на орієнтаційний порядок молекулярного кристалу, на основі аналізу концентраційної залежності дифрагованої інтенсивності. Досліджена кінетика рекристалізаційних процесів в кріосплавах N_2 – CH_4, обумовлених відпалом. Одержано інформацію про фазову діаграму сплаву N_2 - CH_4 в предплавильній області. Встановлено, що в зразках складу 25 - 45 мол. % CH_4 формується ГЩУ структура, подібна до β - N_2, а для 55 - 75 мол. % CH_4 ґратка відповідає ГЩУ структурі, яка подібна до ГЩУ CH_4.

Проведена апробація кластерної моделі для бінарних розчинів до 15мол.% домішку.

Розроблена методика для отримання наноструктурного сплаву Ar – Kr з незвичною морфологією: ГЦК та ГЩУ фази аргону, а також інтенсивне

криптонове гало. Доведено, що зниження температури газової суміші сприяє зародкоутворенню в газовому потоці та формує не класичні сплави аргон-криптон.

Ключові слова: кріокристали, електронографія, бінарні сплави, молекулярні кристали, ГЦК фаза, ГЩУ фаза, орієнтаційний порядок, кластерна модель, параметр ґратки, фазова діаграма.

АННОТАЦИЯ

Мисько-Крутик Н.С. Структура и морфология бинарных сплавов на основе Ar, Kr, N_2, CH_4. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Физико-технический институт низких температур имени Б. И. Веркина НАН Украины, Харьков, 2020.

В диссертационной работе представлены результаты структурных электронографических исследований бинарных сплавов Ar - Kr, N_2 - Kr и N_2 - CH_4 во всей области взаимных концентраций.

Экспериментально определена область распада в системах Ar - Kr в концентрационном интервале 50 - 70 мол. % Ar, что является прямым доказательством ограниченной растворимости твердого раствора. Было установлено сосуществование двух фаз ГЦК и ГПУ в атомарно молекулярном сплаве $N_2 - Kr$ в концентрационном интервале 58 - 89 мол. % Kr с помощью впервые использованного полнопрофильного анализа. Максимальный долевой вклад ГПУ фазы наблюдался при концентрации 89 мол. % Kr. В сплавах на основе азота было исследовано влияние сферическо-нейтральной примеси на ориентационный порядок и рассчитан коэффициент ориентационного порядка на основании экпериментальной и расчетной концентрационной зависимость дифрагированной интенсивности. Проведен расчет избыточных объемов на единицу примеси для образцов сплава $N_2 - Kr$, что дало возможность объяснить протяжность интервала существование твердого раствора. Для сплава CH_4 - N_2. установлено, что в предплавильной области фазовой диаграммы, в интервале 25 - 45 мол. % CH_4, сплав метан-азот формировал ГПУ структуру подобную к β - N_2, а для образцов с концентрацией метана 55 - 75 мол. % - решетка соответствовала ГПУ структуре, которая подобна к ГПУ CH_4.

Проведена апробация кластерной модели концентрационной зависимости параметра решетки для Ar - Kr, N_2 - Kr и N_2 - CH_4 сплавов, которая корректно описала слабые растворы.

Разработана методика получения нанокристаллического сплава Ar – Kr с необычной морфологией. Показано, что снижение температуры газовой смеси способствует зародышеобразованию в газовом потоке и формирует полифазные сплавы аргон-криптон.

Ключевые слова: криокристаллы, электронография, бинарне сплавы, молекулярные кристаллы, ГЦК фаза, ГПУ фаза, ориентационный порядок, кластерная модель, параметр решетки, фазовая диаграмма.

ABSTRACT

Mysko-Krutik N. S. Structure and morphology of binary alloys based on Ar, Kr, N_2, CH_4. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in physics and mathematics (PhD) by speciality 01.04.07 – solid state physics. – B. I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the NAS of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation presents the results of structural electron diffraction studies of binary alloys Ar - Kr, N_2 - Kr and N_2 - CH_4 in all regions of mutual concentrations.

Direct structural evidence of limited solubility in the Ar - Kr atomic macrosystem has been obtained. Two 2-phase regions for the N_2 - Kr alloys are experimentally has been detected. The impurity influence (krypton, or methane) on the orientation order of N_2 molecular crystal has been determined based on the analysis of the concentration dependence of the diffraction intensity. The kinetic of the recrystallization process caused by annealing in cryoalloys N_2 - CH_4 has been studied. Information about the phase diagram N_2 - CH_4 in the pre-melting region has been obtained. Experiments indicate that in the pre-melt region, a methane-nitrogen alloy in the 25 – 45mol. % CH_4 range has a β - N_2 structure, while for samples with 55 – 75 mol. % methane the lattice corresponds to HCP CH_4.

The cluster model of binary solutions (0 – 15 mol. % impurity) was tried out.

A technique for obtaining nanostructured alloy Ar - Kr with unusual morphology: FCC and HCP phases of argon and intense halo, which is characteristic of krypton in the dispersed state has been developed. It is proved that pre-cooling gas mixtures led to the nucleation formation in the gas stream and forming of non-classical argon-krypton alloys.

Keywords: cryocrystals, THEED, binary alloys, molecular crystals, FCC phase, HCP phase, orientational order, cluster model, lattice parameter, phase diagram.

Формат 60х84. Ум. друк.арк. 0.9. Тир. 100 прим.
Підписано до друку 17.07.2020. Папір офсетний
Віддруковано в друкарні ТОВ «Цифра Принт»
на цифровому лазерному комплексі Xerox DocuTech 6135.
Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 3.08.2009 р
Адреса: м. Харків, вул. Данилевського, 30.