

ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертаційну роботу Солопіхіна Дмитра Олексійовича
«Високочисті метали для низькофонових сцинтиляторів»,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико - математичних
наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла

Актуальність теми. Розвиток сучасної фундаментальної та прикладної науки неможливо представити без розробки та досліджень нових матеріалів. Останнім часом проявляється підвищений інтерес до отримання високочистих Cd, ^{106}Cd , ^{116}Cd і Pb, який визначається необхідністю їх застосування в процесі отримання високоякісних детекторів, необхідних для вивчення актуальних проблем ядерної фізики та астрофізики.

Сучасною проблемою астрофізики є вивчення рідкісних розпадів атомних ядер, дослідження яких в Україні почали більше 30 років тому в підземній Солотвінській лабораторії. Сьогодні, експерименти спрямовані на реєстрацію часток темної матерії, 2β -розпаду (який дозволяє вивчати властивості нейтрино) та інших рідкісних ядерних подій набули свого поширення в найсучасніших лабораторіях світу, в тому числі й в підземній Національній лабораторії Гран Сассо (Італія). Всі ці експерименти відбуваються за допомогою низькофонової ядерної спектрометрії, яка потребує найсучасніших високоякісних низькофонових сцинтиляційних детекторів. Якість сцинтиляційних детекторів та чутливість низькофонових експериментів першочергово залежить від якості надчистих компонент, які використовуються в процесі росту сцинтиляційного кристалу, з якого й виготовляється сцинтилятор. Тому до вихідних надчистих компонент ставляться певні вимоги, які можна забезпечити розробкою і вдосконаленням процесів їх рафінування.

Таким чином дослідження процесів глибокого рафінування та розробка нових комплексних методів отримання високочистих Cd, ^{106}Cd , ^{116}Cd і Pb, придатних для створення низькофонових сцинтиляторів, а також

вивчення властивостей отриманих металів та сцинтиляційних кристалів на їх основі, є важливим і **актуальним**.

Актуальність теми дисертації підтверджується широким застосуванням отриманих в роботі металів не тільки в сцинтиляційних, а й напівпровідникових детекторах. Про це говорить велика кількість публікацій і конференцій по твердотільним детекторам. Крім того, дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з виконанням ряду державних і галузевих програм, проектів і договірних робіт, які виконувалися в ННЦ ХФТІ:

- НДР «Розвиток фізичних основ глибокого рафінування металів і створення на їх основі сплавів для атомної і термоядерної енергетики» на 2005-2010 рр. Робота виконувалась в рамках Відомчої тематики ННЦ ХФТІ. Шифр ІІІ-11-06 (ІФТТМТ), державний реєстраційний номер 080906UP0010;

- НДР «Розробка наукових основ отримання високочистих кристалічних і аморфних матеріалів на основі Ве, Zr, Hf та інших металів з поліпшеними фізико-механічними і радіаційними властивостями, які використовуються в ядерній фізиці та енергетиці» на 2011-2015 рр. Робота виконувалась в рамках Відомчої тематики ННЦ ХФТІ. Шифр ІІІ-11-11 (ІФТТМТ), державний реєстраційний номер 0111U008993;

- НДР «Фундаментальні наукові дослідження зі створення конструкційних та функціональних матеріалів з керованою структурою на основі чистих та надчистих металів (Zr, Hf, Ве, Mg, Nb, Cd, Zn, Ag, Те, РЗМ та ін.) з властивостями, що забезпечують сталий розвиток та конкурентоспроможність ядерної енергетики та інших галузей економіки України» на 2016-2020 рр. Робота виконувалась в рамках Відомчої тематики ННЦ ХФТІ. Шифр ІІІ-1-16 (ІФТТМТ), державний реєстраційний номер 0116U006366;

- НТР «Розробка технологічного процесу очистки ізотопно-збагаченого кадмію до високого ступеня чистоти». Виконана за договором № 06/11 від 20 лютого 2008 р. з Інститутом ядерних досліджень НАН України, м. Київ;

- НТР «Очистка зразків ізотопно-збагаченого кадмію до високого

ступеня чистоти». Виконана за договором № 08/11 від 20 лютого 2008 р. з Інститутом ядерних досліджень НАН України, м. Київ;

- НТР «Розробка способу отримання високочистого свинцю». Виконана за договором № 14/11 від 09 квітня 2008 р. з Інститутом ядерних досліджень НАН України, м. Київ;

- НТР «Розробка процесу отримання і виготовлення дослідної партії високочистого археологічного свинцю». Виконана за договором № 11/11-2010 від 29 жовтня 2010 р. з Інститутом ядерних досліджень НАН України, м. Київ;

- НТР «Очистка археологічного Pb для отримання кристалів $PbWO_4$ ». Виконана на замовлення Національного інституту ядерної фізики (Рим, Італія) №7346 від 25 вересня 2017 року;

- НДР «Розробка технології отримання монокристалів $CdZnTe$ спектрометричної якості та детекторів на їх основі для діагностики та контролю процесів і обладнання АЕС». Робота виконувалась спільно з Інститутом монокристалів НАН України в період 2016-2018 рр., згідно з програмою НАНУ «Наукове забезпечення розвитку ядерно-енергетичного комплексу та перспективних ядерних технологій». Шифр – «ГЕТТЕР», державний реєстраційний номер 0116U001772.

Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі, базується на аналізі літературних джерел, з якого органічно випливає постановка мети і задач дослідження. Виконання поставленої мети досягається використанням відомих обчислювальних методів, новітніх експериментальних методів рафінування, сучасних методів дослідження властивостей та прецизійних методів визначення вмісту домішкових елементів; високим ступенем кореляції отриманих результатів розрахунків з наявними експериментальними даними, щодо поведінки й розподілу

домішок в процесі рафінування дистиляцією в вакуумі; критичним аналізом отриманих експериментальних даних на основі сучасних уявлень експериментальної і теоретичної фізики твердого тіла.

Основні положення й висновки дисертаційної роботи добре відповідають змісту отриманих результатів і є цілком **обґрунтованими** і **достовірними**.

До основних нових наукових результати дисертації слід віднести наступні:

1) Результати комплексних розрахункових досліджень поведінки домішкових елементів у процесах рафінування Cd і Pb різноманітними методами;

2) Створення на їх основі новітніх методів рафінування, які забезпечують високий рівень чистоти та вихід придатного продукту, що дало можливість отримати високочисті Cd, ^{106}Cd , ^{116}Cd , $^{\text{арх}}\text{Pb}$ та на їх основі високоякісні низькофонові сцинтиляційні кристали, придатні для пошуку рідких ядерних подій в астрофізиці;

3) Виявлення нових фізичних ефектів при дослідженні високочистих Cd, ^{106}Cd , ^{116}Cd , зокрема ефект аномального зростання зерен при пластичній деформації високочистого Cd при кімнатній температурі, який різко посилюється із підвищенням чистоти кадмію й зменшенням швидкості деформації та ізотопічні ефекти першого та другого порядку в швидкості поширення та загасання повздовжніх ультразвукових хвиль при низьких температурах (77 - 300 K) в високочистих ізотопно-збагачених ^{106}Cd , ^{116}Cd ;

Практичне значення одержаних результатів для науки й практики полягає в застосуванні розробленого процесу глибокого рафінування (Пат. № 94547, № 131214), для одержання високочистих (> 99,999 мас.%) гранульованих зразків ^{106}Cd , ^{116}Cd , $^{\text{арх}}\text{Pb}$, які були використані в якості компонентів для створення низькофонових сцинтиляторів і світловодів на основі вольфраматів $(\text{Cd}, ^{106}\text{Cd}, ^{116}\text{Cd}, ^{\text{арх}}\text{Pb})\text{WO}_4$. Ці сцинтилятори сьогодні

застосовуються в підземній Національній лабораторії Гран Сассо (Італія), для пошуку 2β -розпаду ядра ^{106}Cd , з використанням кристала $^{\text{арх}}\text{PbWO}_4$ в якості світловода. Крім того, розроблений процес виготовлення та пристрій для гранулювання легкоплавких металів застосовувались і для отримання напівпровідникових монокристалів CdZnTe при виконанні спільних робіт з Інститутом монокристалів НАН України в період 2016-2018 рр. і монокристалів Zn^{82}Se при виконанні спільних робіт з Інститутом сцинтиляційних матеріалів НАН України та Національним інститутом ядерної фізики (Рим, Італія). Результати досліджень фізико-механічних властивостей високочистих кадмію та його ізотопів дають змогу розширити уявлення про ці матеріали.

Основні результати роботи в повному обсязі опубліковані у 31 науковій праці, з них 11 наукових статей у фахових журналах, 2 патенти України, 16 матеріалів та тез доповідей на міжнародних та національних наукових конференціях. Автореферат **повно** та **точно** відображає зміст дисертації.

По тексту та змісту дисертації можна зробити наступні зауваження:

1. У розділі 5.2 на стор. 113 при розгляді лінійного характеру ізотопічного ефекту, посилаючись на умови його виконання, автор помилково зауважив «оскільки конфігурація електронних оболонок атомів вельми слабо залежить від розміру ядра». Останнє твердження помилкове, бо при розгляді електронної підсистеми ядро атома завжди вважається точковим. Певно, автор мав на увазі залежність не від розміру, а від маси ядра ізотопу.
2. У розділі 5.2 на стор. 113-114 запропоновано за висловом автора «універсальне співвідношення» для опису впливу ізотопічного ефекту на швидкість ультразвуку. По-перше, для підтвердження «універсальності» запропонованого співвідношення його слід було перевірити не тільки для

ізоотопів кадмію, але й для інших (надчистих) матеріалів. По-друге, вельми незрозумілим є запропоноване в цьому співвідношенні визначення допоміжної величини $M_c^{(2)}$ – «зафіксований ізоотопний склад маси 2». Останнє визначення не містить фізичного змісту та потребує більш зрозумілого пояснення.

3. У розділі 5.3 автором запропоновано порівняння деяких сцинтиляційних властивостей кристалів вольфрамату кадмію (CWO), виготовлених з шихти, яка має різний ізоотопний склад кадмію. Але для найбільш повного з'ясування впливу ізоотопного складу на властивості означеного сцинтилятора слід було навести дані не тільки для «ізоотопних» сцинтиляторів $^{106}\text{CdWO}_4$ та $^{116}\text{CdWO}_4$, а також для сцинтилятору $^{\text{nat}}\text{CdWO}_4$ з природним складом кадмію.

4. Слід відзначити, що широке застосування кадмієвих сцинтиляторів типу CWO в значній мірі обмежене сучасними директивами ЕС та США щодо небезпечності та заборони використання кадмію. Але, крім суто наукових застосувань для прецизійних експериментів (болометрів) у фізиці високих енергій, іншим не менш важливим застосуванням наробок даної роботи може бути розробка напівпровідникових детекторів типу CdTe чи CdZnTe (CZT), спектрометрична якість яких в значній мірі залежить від чистоти їх складових, зокрема кадмію. Нажаль, крім декількох згадувань у вступі та літературному огляді, автором зовсім не було приділено уваги даному питанню у дисертації.

5. У тексті дисертації зустрічаються друкарські помилки та технічні недоліки. Зокрема, одиниці вимірювання температури у різних розділах дисертаційної роботи наведені по-різному - де у К, де у $^{\circ}\text{C}$, концентрація домішок також наводиться в ppm, ppb та мас. %.

6. У останньому розділі бажано було б зазначити, які властивості досліджувались на зразках високочистого свинцю, які результати отримано, чи це є предметом подальших досліджень?

ВИСНОВОК

Вказані недоліки не знижують наукової і практичної значимості роботи, виконаної дисертантом.

На підставі викладеного вище слід зробити висновок про те, що дисертація Солопихіна Дмитра Олексійовича «Високочисті метали для низькофонових сцинтиляторів» є завершеною науковою працею, де були отримані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності є суттєвими для розвитку напрямку, пов'язаного з отриманням надчистих металів з певними характеристиками для створення сцинтиляційних і напівпровідникових детекторів.

Проведені в роботі дослідження відповідають паспорту спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

На мою думку, дисертація Солопихіна Д.О. відповідає всім вимогам ДАК МОН України, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, а також пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів».

Вважаю, що Солопихін Дмитро Олексійович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
директор Інституту монокристалів НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор,
член-кореспондент НАН України

І. М. Притула

Підпис д.-ра фіз.-мат. наук, проф.,
чл. кор. НАН України Притули І.М.
ЗАСВІДЧУЮ
Вчений секретар
Інституту монокристалів НАН України
к.ф.-м.н.



К.М. Кулик