

К. ф. -м. н. О. І. КОНДРИК¹, д. ф. -м. н. Г. П. КОВТУН^{1, 2}, к. ф. -м. н. О. П. ЩЕРБАНЬ¹,
к. ф. -м. н. Д. О. СОЛОПІХІН¹

Україна, ¹ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ОЦІНКА ЧИСТОТИ Cd, Zn, Pb ШЛЯХОМ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРООПОРУ ЗА ТЕМПЕРАТУРИ РІДКОГО АЗОТУ

Залежність електроопору легкоплавких металів Cd, Zn, Pb від ступеня їхньої чистоти досліджувались за допомогою неруйнівної методики безконтактної реєстрації згасних вихрових струмів, індукованих в циліндричних зразках. В результаті комп'ютерного аналізу записаних сигналів були встановлені ділянки спадних кривих, з яких можна визначити питомий опір досліджуваних матеріалів. Встановлено залежність між чистотою металів та їхнім питомим опором за температури 77 К. Обґрунтовано можливість якісної оцінки чистоти легкоплавких металів без використання рідкого гелію.

Ключові слова: неруйнівний аналіз, питомий опір, чистота, легкоплавкі метали.

Високочисті легкоплавкі метали Cd, Zn, Pb та ^{арх}Pb (археологічний свинець) знайшли використання як складові компоненти напівпровідникових датчиків гамма- та рентгенівського випромінювання на основі CdTe та CdZnTe [1—3], а також низькофонових сцинтиляційних детекторів CdWO₄ [4—6], PbWO₄ [7, 8], ZnWO₄ [9—11], необхідних для проведення актуальних експериментів, спрямованих на дослідження властивостей нейтрино, пошуку частинок темної матерії, рідкісних альфа- й бета-розпадів [12]. Нейтрино відіграють ключову роль у фізиці елементарних частинок. Виявити їх та встановити їхню природу дозволяє, крім іншого, вивчення 2β-розпаду ядер ізотопів ¹⁰⁶Cd, ¹¹⁶Cd та ⁶⁴Zn. Зокрема, вольфрамат археологічного свинцю ^{арх}PbWO₄ з низьким вмістом радіоактивного ізотопу ²¹⁰Pb, використовують як світловоди для низькофонових сцинтиляційних детекторів з кристалами CdWO₄ [13]. Також наразі розробляється новітній міжнародний проєкт RES-NOVA, спрямований на виявлення випромінювань нейтрино від космічних об'єктів з використанням масивних криогенних детекторів з кристалів ^{арх}PbWO₄ [14].

Ефективність реєстрації та чутливість детекторів суттєво залежить від чистоти складових елементів детекторних матеріалів [15, 16]. Досить простим та ефективним методом оцінки чистоти металів є вимірювання їхнього питомого опору ρ в умовах низьких температур. Найбільшого поширення набули вимірювання ρ за температури 4,2 К, проте рідкий гелій є досить дорогим і його застосування не завжди виправдано. Певний інтерес представляють методики неруйнівного аналізу, однією з яких є безконтактна реєстрація згасних вихрових струмів, що індукуються у циліндричних зразках після вимкнення зовнішнього магнітного поля, створюваного соленоїдом.

Метою роботи було визначення можливості оцінки чистоти легкоплавких металів за допомогою методики вимірювання характерного часу затухання вихрових струмів за температури рідкого азоту.

Прилади та устаткування

На рис. 1 зображено блок-схему створеної установки, яка складається з гелієвого (або азотного) кріостату, тримача, в контейнері якого розміщується циліндричний зразок металу, соленоїда, вимірювальної (реєструвальної) котушки. Для наочності на рис. 1 показані умовні схеми з роздільним підведенням провідників до котушок. У реальній схемі комутація здійснюється через спільний роз'єм.

До системи реєстрації сигналу входять блок керування, який складається з джерела струму та

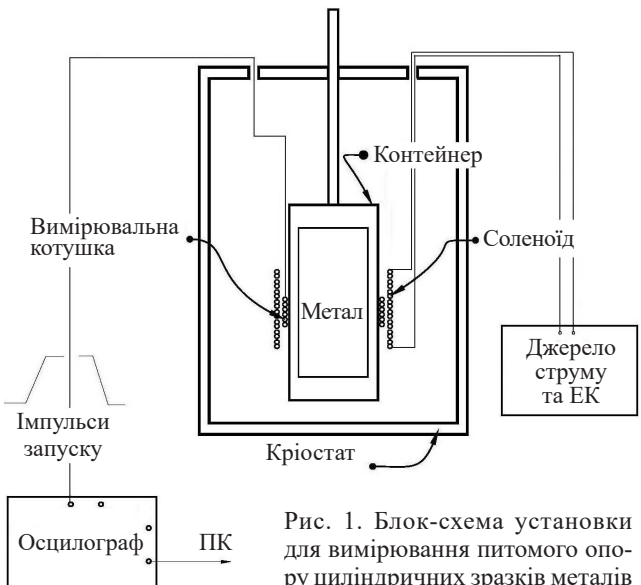


Рис. 1. Блок-схема установки для вимірювання питомого опору циліндричних зразків металів

електронного ключа (ЕК), цифрового осцилографа OWON XDS2102A. Механічна кнопка блока керування з'єднується зі схемою електронного ключа. Регуляторами струму (від 0 до 5 А) та напруги (до 15 В) змінювалась величина магнітного поля соленоїда, який складається з двошарової намотки у 200 витків мідного проводу діаметром 0,5 мм. Реєструвальна котушка складається з багатошарової намотки в 3000 витків діаметром 0,12 мм. Після натискання кнопки ЕК через соленоїд починає текти струм величиною 2—3 А, при цьому через металевий зразок всередині контейнера проходять силові лінії постійного магнітного поля. Після відпускання кнопки ЕК та переривання струму магнітне поле починає різко зменшуватися, але в зразку, що виступає в ролі сердечника соленоїда, починають протікати вихрові струми, що перешкоджають зменшенню напруженості цього магнітного поля. Оскільки зразок за кімнатної температури $T_{\text{кімн}}$ має відносно великий питомий опір ρ , індуковані вихрові струми у зразку згасають приблизно за кілька сотень мікросекунд залежно від величини ρ . Згасальні вихрові струми наводять у реєструвальній котушці напругу (е.р.с.), яка подається на вхід одного з двох каналів осцилографа.

Реєстрація сигналу осцилографом здійснюється в режимі запису поодинокого сигналу (опція *Single*) при запуску по фронту *Edge*, який відбувається, коли фронт вхідного сигналу досягає встановленого рівня. В нашому випадку запис сигналу починається з певної величини напруги згасних по амплітуді осциляцій, що створюються брязканням механічних контактів кнопки ключа. Ця напруга задається регулюванням рівня тригера *Trigger Level*. Сигнал відображається на екрані у вигляді початкових великих осциляцій амплітудою до 5 В, які частково придушуються схемою ЕК, з подальшим корисним сигналом у вигляді спадної кривої.

На описаній установці спочатку виконували пробні вимірювання сигналів, одержаних від зразків

міді технічної чистоти (діаметр $d = 14$ мм, довжина $L = 70$ мм) та зразків чистого кадмію ($d = 16$ мм, $L = 30$ мм). Результати показані на **рис. 2**: початкові частини (ліворуч) зображують згасні синусоїдні осциляції, далі (праворуч) — струми затухання, що індукуються у циліндричних зразках. Як видно, крива вихрових струмів затухання для міді більш полого, ніж для кадмію, через більший характерний час затухання τ й, відповідно, меншу величину ρ для Cu у порівнянні з Cd. На кривій затухання накладаються малі короткочасні імпульси, що викликані наводками в електричній мережі від працюючих технологічних установок.

Матеріали для досліджень та технології їх одержання

Для визначення відносного залишкового опору кадмію, цинку і свинцю використовували матеріали технічної чистоти (вміст основи 99,90...99,98 %) і зразки тих же металів після очищення (> 99,990...99,999 %).

Очищення кадмію і цинку виконували комплексним методом рафінування, який складався з двох етапів. На першому етапі проводили очищення від легколетких домішок (Na, Ca, S, P, Cl тощо) шляхом прогріву та фільтрації металу в атмосфері інертного газу високої чистоти, на другому — від важколетких домішок (Fe, Ni, Si, Al, Cu тощо) методом дистиляції з конденсацією пару чистого металу на гарячий конденсатор. Важколеткі домішки при цьому залишалися на дні тигля. Схему дистиляційного пристрою наведено, наприклад, у роботі [17]. Всі деталі пристрою, які контактували з металом, виготовлялися з графіту високої чистоти марки МПГ-7. Процес дистиляції виконували у вакуумі за остаточного тиску 10^{-4} — 10^{-2} Па.

Свинець очищували за допомогою раніше розробленого пристрою [18], який дозволяє проводити процес рафінування металу з конденсацією його пару [19]. Така процедура очищення обумовлена специфі-

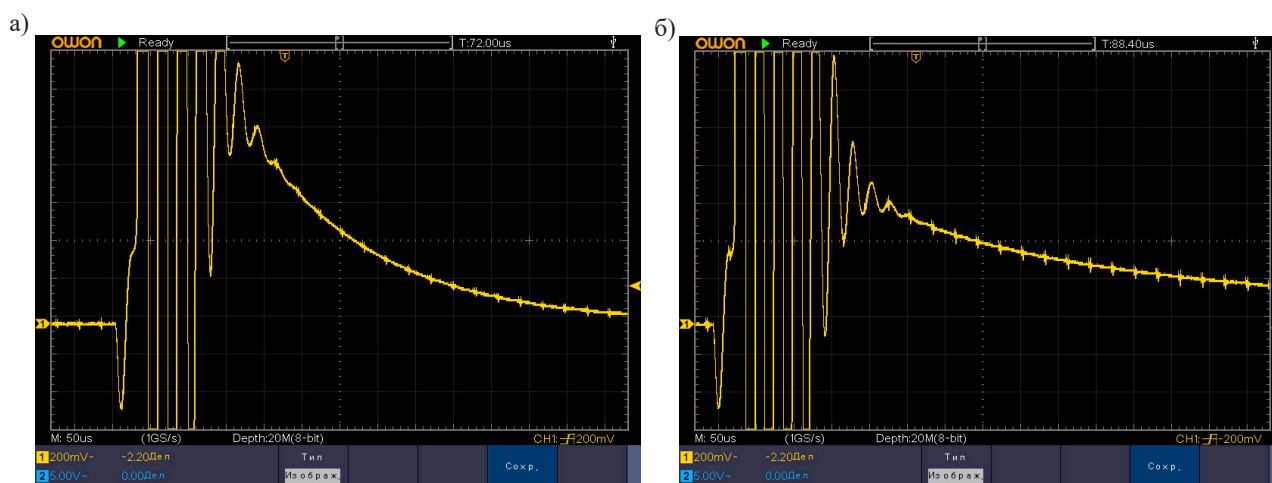


Рис. 2. Сигнали на екрані осцилографа при вимірюванні згасної е.р.с., що наводиться у вимірювальній котушці вихровими струмами в зразках чистого Cd (а) та Cu технічної чистоти (б)

кою властивостей свинцю — великою різницею між температурами плавлення та випаровування металу.

Пристрій для дистиляції свинцю виготовляли із щільного графіту високої чистоти, хімічно інертного до свинцю. В запропонованій схемі рафінування одночасно відбувається очищення від важколетких і легколетких домішок, що значно підвищує продуктивність процесу та вихід придатного продукту.

Отримані після очищення метали Cd, Zn, Pb, ^{арх}Pb розливалися, як і вихідні, в циліндричні мірні зливки заданого діаметра для подальшого вимірювання відносного залишкового опору за кімнатної температури та температури рідкого азоту ($T = 77$ К).

Результати досліджень та їх обговорення

Залежності електроопору легкоплавких металів Cd, Zn, Pb, ^{арх}Pb від ступеня їхньої чистоти досліджувались за допомогою описаної установки. Вихрові струми відображались на екрані цифрового осцилографа у вигляді спадних кривих, крутизна яких залежала від питомого опору ρ металічних зразків, розміщених всередині соленоїда та реєструвальної котушки. Отримані криві у цифровій формі передавалися з пам'яті осцилографа до персонального комп'ютера. Для спрощення подальшої обробки ці цифрові сигнали відображали спадні криві без осциляцій в межах екрана осцилографа й склалися з 1000 точок.

В результаті кількісного комп'ютерного аналізу записаних сигналів було встановлено, що їхні початкові ділянки $U(t)_{\text{init}}$ можна представити у вигляді суми

$$U(t)_{\text{init}} = \sum_{i=1}^n U_i \exp(-t / \tau_i), \quad (1)$$

де t — час;

U_i — амплітуда i -тої кривої;

τ_i — характерний час i -тої експоненційно спадної кривої вихрового струму.

Кінцеві ділянки спадних кривих, що розташовуються безпосередньо перед сигналом величиною $U(t) \rightarrow 0$, можна представити як

$$U(t) = U_0 \exp(-t / \tau), \quad (2)$$

де U_0 — початкова амплітуда корисного сигналу;

τ — характерний час затухання вихрового струму, індукованого в металічному зразку.

Для визначення τ використовувався метод найменших квадратів. Аналіз та співставлення значень характерного часу затухання зразків Cd, Zn, ^{арх}Pb, Pb, виміряних за кімнатної температури, з відомими величинами питомого опору $\rho_{20^\circ\text{C}}$, які були отримані для цих металів при $T = 20^\circ\text{C}$, показав, що питомий опір зразків можна приблизно описати формулою

$$\rho = \frac{2,17d^2}{4\tau} \cdot 10^{-9} [\text{Ом} \cdot \text{см}], \quad (3)$$

де d — [см], τ — [с].

Похибка такого вимірювання не перевищувала 3% і залежала головним чином від точності вибору однакових ділянок згасних кривих, отриманих в різних вимірюваннях.

Потім було проведено аналіз характерного часу затухання τ вихрових струмів в зразках, виміряного за температури 77 К, та обчислення питомого опору зразків за формулою (3).

Дані, отримані в результаті досліджень, представлені у **таблиці**. Слід зазначити, що вимірювання характерного часу затухання й формування цифрових сигналів для Cd і Zn за кімнатної температури проводилось на початкових ділянках спадних кривих вихрових струмів, тому одержані величини τ виявились меншими, а ρ — більшими, ніж відомі величини, отримані при $T = 20^\circ\text{C}$.

Вимірювання τ для зразків свинцю №9 — №11 проводились на кінцевих ділянках спадних кривих, але за температури навколишнього середовища близько 13°C , тому величини ρ виявились дещо нижчими, ніж відомі $\rho_{20^\circ\text{C}}$. З іншого боку, після нагріву зразка №11 на кілька градусів виявилось, що його питомий опір збільшився до $2,197 \cdot 10^{-5}$ Ом·см, що практично співпадає з відомим значенням $\rho_{20^\circ\text{C}}$ (див. таблицю).

Оскільки створення системи термостабілізації для вимірювання τ при $T = 20^\circ\text{C}$ ускладнює установку, але не додає нової інформації, в подальших вимірюваннях при визначенні відносного електроопору $\rho_{\text{кімн}} / \rho_{77\text{К}}$ було вирішено користуватись відомими величинами $\rho_{20^\circ\text{C}}$, а вимірювання проводити тільки за температури рідкого азоту.

Запис цифрових сигналів та вимірювання τ для зразків Pb №7 і №8 при $T = 77$ К проводилися на серединних ділянках спадних кривих, тому одержані величини $\rho_{77\text{К}}$ були дещо завищеними.

Для зразка Cd №3, отриманого з матеріалу із Заводу чистих металів (м. Світловодськ), величина $\rho_{77\text{К}}$ склала $2,38 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, тоді як для Cd після двократної дистиляції (зразок №4) $\rho_{77\text{К}}$ дорівнювало $1,988 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, тобто менше на $\approx 16,5\%$, що значно перевищує допустиму похибку застосованої методики. Для зразка Zn(99,996) $\rho_{77\text{К}} = 1,8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, для Zn(99,9993) $\rho_{77\text{К}} = 1,68 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, що на $\approx 6,67\%$ менше.

Обробка вимірювань згасних вихрових струмів у зразках свинцю показала, що для Pb технічної чистоти $\rho_{77\text{К}} = (4,4 — 4,5) \cdot 10^{-5}$ Ом·см, а для Pb №9, отриманого після дистиляції, $\rho_{77\text{К}} = (2,95 — 3,28) \cdot 10^{-5}$ Ом·см, що на 29—32% менше.

Отже, з наведених результатів видно, що чим більше зразки відрізняються за чистотою металу, тим більша різниця в значеннях їхнього питомого опору при $T = 77$ К. Інакше кажучи, була встановлена можливість грубої оцінки ступеня чистоти металів шляхом порівняння $\rho_{77\text{К}}$ зразків, одержаних після вищупування та різних процедур глибокої очистки. При цьому, оскільки досліджені метали мають досить

МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Результати вимірювань τ та ρ зразків Cd, Zn, Pb різної чистоти за кімнатної температури $T_{\text{кімн}}$ та $T = 77 \text{ K}$

№	Метал; чистота, %	Діаметр, мм	$\rho_{20\text{C}}$ Ом·см	$\rho_{\text{кімн}}$ Ом·см	$\rho_{77\text{K}}$ Ом·см	$\rho_{\text{кімн}}/\rho_{77\text{K}}$	τ , нс	
							$T_{\text{кімн}}$	77 K
1	Cd технічної чистоти; 99,98	12,4	$7,6 \cdot 10^{-6}$	$7,58 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	3,78	110	416
2	Cd після дистиляції та НК*; 99,998	12,4		$7,80 \cdot 10^{-6}$	$2,27 \cdot 10^{-6}$	3,44	107	368
3	Cd ЗЧМ**	11,75		$8,1 \cdot 10^{-6}$	$2,38 \cdot 10^{-6}$	3,4	92	314
4	Cd після двократної дистиляції; 99,999	11,80		$8,036 \cdot 10^{-6}$	$1,988 \cdot 10^{-6}$	4,04	94	380
5	Zn після двократної дистиляції; 99,9993	12,3	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,68 \cdot 10^{-6}$	3,8	130	488
6	Zn після дистиляції; 99,996	12,4		$6,5 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	3,6	128	462
7	Pb після двократної дистиляції та НК; 99,998	12,5	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-5}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	5,8	41	238
8	^{ар} Pb після двократ- ної дистиляції та НК; 99,999	12,4		$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-6}$	5,7	42	242
9	Pb після двократної дистиляції; > 99,999	12		$2,056 \cdot 10^{-5}$	$2,95 \cdot 10^{-6}$	7,45	38	265
				$2,013 \cdot 10^{-5}$	$3,28 \cdot 10^{-6}$	6,7	38,8	238
10	Pb технічної чистоти; 99,93	16		$2,04 \cdot 10^{-5}$	$4,54 \cdot 10^{-6}$	4,84	68	306
11	Pb технічної чистоти; 99,96	16	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$4,40 \cdot 10^{-6}$	5	68	316	

*НК — спрямована кристалізація; **ЗЧМ — матеріал Заводу чистих металів (м. Світловодськ).

низьку температуру Дебая: Cd — 210 K, Zn — 328 K, Pb — 105 K [20, с. 438], то більш точну оцінку чистоти металів можна отримати шляхом вимірювання питомого опору за температури рідкого гелію.

Висновки

Проста установка, створена в цій роботі, дає можливість безконтактним неруйнівним способом — шляхом реєстрації експоненційно спадних вихрових струмів, що наводяться у циліндричних зразках — отримувати величину питомого електроопору металів за кімнатної та низьких температур. Запропонована методика дозволяє якісно оцінювати чистоту металів без використання коштовного рідкого гелію. Зразки досліджених металів Cd, Zn, Pb, ^{ар}Pb з відомим домішковим складом, як вихідних, так і після очищення за різними технологіями, можуть слугувати мірилом точності для визначення ефективності використаної експериментальної методики оцінки чистоти.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Abbaspour S., Mahmoudian B., Islamian J. P. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Med.* 2017, vol. 16, iss. 2, p. 101—107. <https://doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
2. Johns P. M., Nino J. C. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security. *J. Appl. Phys.* 2019, vol. 126, iss. 4, p. 040902-1—040902-21. <https://doi.org/10.1063/1.5091805>
3. Ridzonova K., Belas E., Grill R., Pekarek J., Praus P. Space charge limited photocurrents and transient currents in CdZnTe radiation detectors. *Phys. Rev. Applied*, 2020, vol. 13, iss. 6, 064054. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.064054>
4. Christos M., Koukou V., Martini N. et al. Luminescence efficiency of cadmium tungstate (CdWO₄) single crystal for medical imaging applications. *Crystals*, 2020, vol. 10 (6), p. 429-1—426-16. <https://doi.org/10.3390/cryst10060429>
5. Ziluei H., Azimirad R., Larjani M., Ziaie F. Preparation and optimization of CdWO₄-polymer nano-composite film as an alpha particle counter. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2017, vol. 852, p. 85—90. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.015>
6. Ying Zhang, Xianchun Zhu, Yao Zhao et al. CdWO₄:Eu³⁺ nanostructures for luminescent applications. *ACS Appl. Nano*

- Mater.*, 2019, vol. 2, iss. 11, p. 7095—7102. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b01625>
7. Kim M.J., Park H., Kim H.J. Characterization of PbWO₄ crystals for high-energy physics experiments. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, vol. 69, iss. 6, p. 1130—1134. <https://doi.org/10.3938/jkps.69.1130>
8. Nedilko S., Chukova O. Luminescent spectroscopy of the Yb³⁺ ions in the PbWO₄ crystal. *Acta Phys. Polon.*, 2018, vol. 133, no. 4, p. 918—922. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.133.918>
9. Belli P., Bernabei R., Borovlev Yu. A. et al. New development of radiopure ZnWO₄ crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2019, vol. 935, iss. 11, p. 89—94. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.014>
10. Heon Yong Jeong, Ju Hyuk Lee, Sang Yoon Lee et al. A transparent nano-polycrystalline ZnWO₄ thin-film scintillator for high-resolution x-ray imaging. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, iss. 48, p. 33224—33230. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05962>
11. Belli P., Bernabei R., Borovlev Yu.A. et al. Optical, luminescence, and scintillation properties of advanced ZnWO₄ crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2022, vol. 1029, 166400. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166400>
12. Barabash A.S. Double beta decay experiments: current status and prospects. *Physics Procedia*, 2014, vol. 57, no. 5, p. 416—422. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.215>
13. Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychiev V.V. et al. Application of PbWO₄ crystal scintillators in experiment to search for 2β decay of ¹¹⁶Cd. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2006, vol. 556, iss. 1, p. 259—265. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.09.049>
14. Pattavina L., Iachellini N.F., Tamborra I. Neutrino observatory based on archaeological lead. *Phys. Rev. D*, 2020, vol. 102, iss. 6, 063001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.063001>
15. Guoqiang Li, Xiaolu Zhang, Hui Hua, Wanqi Jie. Upgrading of CdZnTe by annealing with pure Cd and Zn metals. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, vol. 21, no. 3, p. 392—396. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/3/032>
16. Zaioura A., Ayoubb M., Hamiéc A. et al. Preparation of high purity CdTe for nuclear detector: electrical and nuclear characterization. *Physics Procedia*, 2014, vol. 55, p. 476—484 <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.069>
17. Щербань А.П., Ковтун Г.П., Горбенко Ю.В. и др. Получение высокочистых гранулированных металлов: кадмия, цинка, свинца. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2017, № 1–2, с. 55—60.
18. Щербань О.П., Ковтун Г.П., Солопихін Д.О. Пристрій для рафінування металів дистиляцією у вакуумі. Пат. 94547 України, 2011, бюл. № 9.
19. Boiko R.S., Virich V.D., Danevich F.A. et al. Ultrapurification of archaeological lead. *Inorganic Materials*, 2011, vol. 47, no. 6, p. 645—648. <https://doi.org/10.1134/S0020168511060069>
20. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник. Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

Дата надходження рукопису
до редакції 28.06 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.46
UDC 669.054+539.1.074

O. I. KONDRIK¹, G. P. KOVTUN^{1, 2},
O. P. SHCHERBAN¹, D. O. SOLOPIKHIN¹

Ukraine, Kharkiv, ¹NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology»,
²V. N. Karazin Kharkiv National University
E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ESTIMATING PURITY OF Cd, Zn, Pb BY NON-CONTACT MEASUREMENT OF SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE AT LIQUID NITROGEN TEMPERATURE

High-purity fusible metals Cd, Zn, Pb and archaeological ^{arch}Pb are used as component elements in semiconductor and low-background scintillation detectors based on CdTe, CdZnTe, CdWO₄, PbWO₄, ZnWO₄ required for registering ionizing radiation and searching for particles of dark matter, rare alpha and beta decays. The detection efficiency and the sensitivity of detectors significantly depend on the purity of the constituent elements of detector materials. The dependence of the resistivity of fusible metals Cd, Zn, Pb on the degree of their purity was studied using the non-destructive technique of registering the decaying vortex currents induced in cylindrical samples after dropping the external magnetic field. The aim of the work was to determine the possibility of evaluating the purity of fusible metals using a simple methodology for measuring the characteristic times of decay of vortex currents at 77 K without the use of liquid helium.

The computer analysis of the recorded signals presented in the form of decaying curves allowed finding the areas where the signal can be represented as an exponent with a characteristic decay time τ and determining a formula that related τ, specific resistance ρ, and the diameter of cylindrical samples. A comparison of the ρ values of both the initial samples of cadmium, zinc, lead, and archaeological lead, and those samples after various purification procedures, allowed establishing the dependence of the resistivity on the purity of the studied materials at the temperature of liquid nitrogen ρ₇₇. The greater the difference in the purity of the fusible metal, the more their values ρ₇₇ were different. Thus, the authors substantiated the possibility of a qualitative assessment of the purity of metals using contactless measurement and comparison of ρ₇₇ for samples obtained after growing and various deep purification procedures.

Keywords: non-destructive analysis, specific resistance, purity, fusible metals.

REFERENCES

1. Abbaspour S., Mahmoudian B., Islamian J. P. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Med.* 2017, vol. 16, iss. 2, pp. 101—107. <https://doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
2. Johns P. M., Nino J. C. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security. *J. Appl. Phys.* 2019, vol. 126, iss. 4, pp. 040902-1 — 040902-21. <https://doi.org/10.1063/1.5091805>
3. Ridzonova K., Belas E., Grill R., Pekarek J., Praus P. Space charge limited photocurrents and transient currents in CdZnTe radiation detectors. *Phys. Rev. Applied*, 2020, vol. 13, iss. 6, 064054. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.064054>
4. Christos M., Koukou V., Martini N. et al. Luminescence efficiency of cadmium tungstate (CdWO₄) single crystal for medical imaging applications. *Crystals*, 2020, vol. 10 (6), pp. 429-1—426-16. <https://doi.org/10.3390/cryst10060429>
5. Ziluei H., Azimirad R., Larijani M., Ziaie F. Preparation and optimization of CdWO₄-polymer nano-composite film as an alpha particle counter. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2017, vol. 852, pp. 85—90. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.015>
6. Ying Zhang, Xianchun Zhu, Yao Zhao et al. CdWO₄:Eu³⁺ nanostructures for luminescent applications. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2019, vol. 2, iss. 11, pp. 7095—7102. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b01625>
7. Kim M.J., Park H., Kim H.J. Characterization of PbWO₄ crystals for high-energy physics experiments. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, vol. 69, iss. 6, p. 1130—1134. <https://doi.org/10.3938/jkps.69.1130>
8. Nedilko S., Chukova O. Luminescent spectroscopy of the Yb³⁺ ions in the PbWO₄ crystal. *Acta Phys. Polon.*, 2018, vol. 133, no. 4, pp. 918—922. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.133.918>
9. Belli P., Bernabei R., Borovlev Yu. A. et al. New development of radiopure ZnWO₄ crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2019, vol. 935, iss. 11, pp. 89—94. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.05.014>
10. Heon Yong Jeong, Ju Hyuk Lee, Sang Yoon Lee et al. A transparent nano-polycrystalline ZnWO₄ thin-film scintillator for high-resolution x-ray imaging. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, iss. 48, pp. 33224—33230. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05962>
11. Belli P., Bernabei R., Borovlev Yu. A. et al. Optical, luminescence, and scintillation properties of advanced ZnWO₄ crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2022, vol. 1029, 166400. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166400>
12. Barabash A.S. Double beta decay experiments: current status and prospects. *Physics Procedia*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 416—422. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.215>
13. Danevich F.A., Georgadze A.Sh., Kobychyev V.V. et al. Application of PbWO₄ crystal scintillators in experiment to search for 2β decay of ¹¹⁶Cd. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 2006, vol. 556, iss. 1, pp. 259—265. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.09.049>
14. Pattavina L., Iachellini N.F., Tamborra I. Neutrino observatory based on archaeological lead. *Phys. Rev. D*, 2020, vol. 102, iss. 6, 063001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.063001>
15. Guoqiang Li, Xiaolu Zhang, Hui Hua, Wanqi Jie. Upgrading of CdZnTe by annealing with pure Cd and Zn metals. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 392—396. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/3/032>
16. Zaioura A., Ayoubb M., Hamiéc A. et al. Preparation of high purity CdTe for nuclear detector: electrical and nuclear characterization. *Physics Procedia*, 2014, vol. 55, pp. 476—484 <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.069>
17. Shcherban A. P., Kovtun G. P., Gorbenko Y. V. et al. Production of high purity granular metals: cadmium, zinc, lead. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no. 1–2, ppp. 55—60. <https://doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.55> [Rus]
18. Shcherban A. P., Kovtun G. P., Solopikhin D. A. *A device for refining metals by vacuum distillation. Pat. 94547 UA*, 2011. [Ukr]
19. Boiko R.S., Virich V.D., Danevich F.A. et al. Ultrapurification of archaeological lead. *Inorganic Materials*, 2011, vol. 47, no. 6, ppp. 645—648. <https://doi.org/10.1134/S0020168511060069>
20. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M. et al. *Fizicheskiye velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Handbook]. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 pp. [Rus]

Опис статті для цитування:

Кондрік О. І., Ковтун Г. П., Щербань О. П., Солопихін Д. О. Оцінка чистоти Cd, Zn, Pb шляхом безконтактного вимірювання питомого електроопору за температури рідкого азоту. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 4–6, с. 46–51. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.46>

Cite the article as:

Kondrik A. I., Kovtun G. P., Shcherban O. P., Solopikhin D. O. Estimating purity of Cd, Zn, Pb by non-contact measurement of specific electrical resistance at liquid nitrogen temperature. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 46–51. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.46>