

УДК 539.1.074.55:004.3

## Вибір елементів детекторного блоку системи для вимірювання координат джерел гамма-випромінювання

Ф. М. Андреев А. В. Осипчук М. Г. Стервоедов

**Андреев Феликс Михайлович***доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроніки та управляючих систем Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. майдан Свободи, 4, Харків, Україна.**e-mail: [andreev.felix36@gmail.com](mailto:andreev.felix36@gmail.com)**<https://orcid.org/0000-0002-7655-3352>***Осипчук Андрій Володимирович***Старший викладач кафедри електроніки та управляючих систем Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, Україна.**e-mail: [osypchuk@karazin.ua](mailto:osypchuk@karazin.ua)**<https://orcid.org/0000-0003-2725-365X>***Стервоедов Микола Григорович***к.т.н., доцент; завідуючий кафедри електроніки та управляючих систем**Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна, Майдан Свободи 4, Харків-22, Україна, 61022**e-mail: [stervoyedov@yahoo.com](mailto:stervoyedov@yahoo.com)**<https://orcid.org/0000-0003-0136-6437>*

У статті розглядається актуальна проблема створення сучасних, ефективних і надійних систем контролю за радіаційною обстановкою та оперативного пошуку ядерних радіоактивних матеріалів і радіаційних джерел, які вийшли з регульованого нагляду. Для радіаційно-екологічного моніторингу, запобіганню наслідків ядерної контрабанди та визначення координат джерел іонізуючого випромінювання застосовується перспективний метод неруйнівного контролю з використанням напівпровідникових детекторів іонізуючих випромінювань. В методі для визначення напрямку на імпульсні і постійні джерела гамма-випромінювання використовується відношення кількості сигналів, які приходять з детекторів, що розташовані в поглиначах спеціальної геометричної форми.

Мета статті - вибір елементів детекторного блоку для засобу, в якому використовується метод поглинання для визначення координат джерела гамма-випромінювання. Основну увагу приділено пошуку оптимальних характеристик матеріалу поглинача випромінювання та вибору детектора.

В статті проводиться детальний аналіз параметрів детекторів ядерних випромінювань з різних напівпровідникових матеріалів, виділяються та описуються їх характерні особливості. Аналіз експериментальних даних і теоретичних розрахунків дозволяють стверджувати, що в разі координатометрії джерел гама - випромінювання в якості матеріалу детектору слід вибирати широкозонний напівпровідник CdZnTe. У детекторів даного типу енергетичний діапазон становить від 20 до 3000 кеВ, діапазон робочих температур — від -40 до +50 °С, енергетичної дозвіл — порядку декількох відсотків.

**Ключові слова:** система контролю, джерело гамма-випромінювання, поглинена доза, детектор напівпровідниковий, кутові координати джерела, CdZnTe НІІД

## Selection of elements of the detector unit for the system to measure coordinates of gamma radiation sources

**Andreev Felix***Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Electronics and Control Systems Department, V.N. Karazin Kharkiv National University. Svobody Sq, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine.***Osipchuk Andriy***Senior lecturer of the Electronics and Control Systems Department, V.N. Karazin Kharkiv National University. Svobody Sq, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine. e-mail: [osypchuk@karazin.ua](mailto:osypchuk@karazin.ua)***Stervoyedov Mykola***Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Electronics and Control Systems Department, V.N. Karazin Kharkiv National University. Svobody Sq, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine.*

The article considers the relevant problem of creating modern, effective and reliable systems for monitoring the radiation situation, and the operational tracking of nuclear radioactive materials and radiation sources which are not under regulated supervision. The promising method of non-destructive testing by means of semiconductor detectors of ionizing radiation is used for monitoring environmental radiation, preventing nuclear smuggling consequences, and determining coordinates of ionizing radiation sources. The method for determining the direction towards both pulsed and constant sources of gamma radiation uses the ratio of the number of signals coming from the detectors placed in the absorbers of a special geometric shape. The purpose of the article is to select the elements of the detector unit for the system, which uses the method of absorption to determine the coordinates of the source of gamma radiation. The main attention is focused on the search for optimal characteristics of the radiation absorber material and the choice of the detector. The article analyzes the parameters of nuclear radiation detectors from different semiconductor materials, highlights and describes their characteristics. Analysis of experimental data and theoretical calculations allows us to assert that in the case of coordinateometry of gamma-radiation sources, a wide-gap semiconductor CdZnTe should be chosen as a detector material. For detectors of this type the energy range is from 20 to 3000 keV, the operating temperature range is from -40 to +50 °C, and the energy resolution is of the order of several percent.

**Keywords:** control system, gamma radiation source, absorbed dose, semiconductor detector, angular coordinates of the source, CdZnTe PPD.

## Выбор элементов детекторного блока системы для измерения координат источников гамма-излучения

<b>Андреев Феликс Михайлович</b>	<i>доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроники и управляющих систем Харьковского Национального университета имени В.Н. Каразина. Площадь Свободы, 4, Харьков, Украина.</i>
<b>Осипчук Андрей Владимирович</b>	<i>старший преподаватель кафедры электроники и управляющих систем Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина, Площадь Свободы, 4, Харьков, Украина.</i>
<b>Стервиедов Николай Григорьевич</b>	<i>кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроники и управляющих систем Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Площадь Свободы, 4, Харьков, Украина.</i>

В статье рассматривается актуальная проблема создания современных, эффективных и надежных систем контроля радиационной обстановки и оперативного поиска ядерных радиоактивных материалов и радиационных источников, которые вышли из регулируемого надзора. Для радиационно-экологического мониторинга, предотвращения последствий ядерной контрабанды и определения координат источников ионизирующего излучения используется перспективный метод неразрушающего контроля с использованием полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений. В методе для определения направления на импульсные и постоянные источники гамма-излучения используется отношение количества сигналов, приходящих от детекторов, расположенных в поглотителях специальной геометрической формы. Цель статьи – выбор элементов детекторного блока для средства, в котором используется метод поглощения для определения координат источника гамма-излучения. Основное внимание уделено поиску оптимальных характеристик материала поглотителя излучения и выбору детектора. В статье проводится подробный анализ параметров детекторов ядерных излучений из разных полупроводниковых материалов, выделяются и описываются их характерные особенности. Анализ экспериментальных данных и теоретических расчетов позволяют утверждать, что в случае координатометрии источников гамма – излучения в качестве материала детектора следует выбирать широкозонный полупроводник CdZnTe. У детекторов данного типа энергетический диапазон составляет от 20 до 3000 кэВ, диапазон рабочих температур – от -40 до +50 °С, энергетическое разрешение – порядка нескольких процентов.

**Ключевые слова:** система контроля, источник гамма-излучения, поглощенная доза, полупроводниковый детектор, угловые координаты источника, CdZnTe ППД.

### 1 Вступ

Проблема створення сучасних, ефективних і надійних систем контролю за радіаційною обстановкою та пошуку ядерних радіоактивних матеріалів і радіаційних джерел, які вийшли з виду регульованого нагляду, остається актуальною. Такі засоби вимірювання іонізаційних випромінювань, що є основою вказаних систем, як іонізаційні камери, пропорційні та газорозрядні лічильники, сцинтиляційні та піроелектричні детектори не в повному обсязі відповідають потребам сьогодення. Для захисту навколишнього середовища та запобіганню наслідків ядерної контрабанди перспективним є метод неруйнівного контролю з використанням напівпровідникових детекторів з асиметричними поглиначами [1–3]. Дана робота присвячена

вибору основних елементів детекторного блоку системи для вимірювання координат джерел гамма-випромінювання, які визначають його вимірювальні характеристики.

## 2 Постановка завдання та аналіз результатів відомих досліджень

В роботі [4] показано, що для визначення однієї кутової координати джерела випромінювання доцільно використовувати 3 детектора з поглиначами. В роботі [5] експериментально доказана можливість вимірювання двох кутових координат точкового джерела гамма-випромінювання з використанням кульового поглиначача та трьох блоків детектування на основі кремнієвих фотодіодів. Можливість визначення напрямку на джерело проникаючих ядерних випромінювань в умовах нерівномірного радіоактивного забруднення встановлена в роботі [6]. В кандидатській дисертації З. В. Білика розроблений пристрій з використання цього методу, визначені показники точності вимірювання кутових координат [7].

Гідність даного методу — оперативність, тобто висока швидкодія. Це робить його перспективним для прийняття термінових заходів в автобронетанкових військах для захисту від ударної хвилі ядерного вибуху за рахунок маневрування та позиціонування техніки до її приходу [8], а також вирішення проблеми вимірювання необхідних і достатніх параметрів імпульсного впливу ядерного вибуху з метою оперативного виявлення боєздатності підрозділів і частин [9].

Поза увагою дослідників виявилось питання, пов'язане з науково обґрунтованим вибором елементів засобу вимірювання координат джерел іонізаційних випромінювань, в якому використовується вказаний вище метод.

**Мета статті:** вибір елементів детекторного блоку засобу, в якому для визначення координат радіаційних джерел використовується метод ослаблення гамма-випромінювання в асиметричних поглиначачах.

## 3 Визначення координат джерел гамма-випромінювання способом асиметричних поглиначів.

В даному способі для визначення напрямку на імпульсні і постійні джерела гамма-випромінювання використовується відношення сигналів, які приходять з детекторів, що розташовані в поглиначачах заданої геометричної форми.

Проходження моноенергетичного пучка гамма-випромінювання через речовину описується законом Бугера, що враховує тільки ефект поглинання гамма-квантів,

$$I = I_0 e^{-\mu(I_0)h}, \quad (1)$$

де  $I_0$  інтенсивність гамма-випромінювання до входу в речовину ( $h = 0$ ), — товщина речовини,  $\mu = \mu_{\Phi\Xi} + \mu_{K\Xi} + \mu_{\text{ПАР}}$  — лінійний коефіцієнт ослаблення гамма-випромінювання (розмірність  $\text{см}^{-1}$ ), що залежить від енергії гамма-випромінювання, і характеристик поглинає речовини. Парціальні коефіцієнти ослаблення в  $\mu = \mu_{\Phi\Xi} + \mu_{K\Xi} + \mu_{\text{ПАР}}$  обумовлені фотоефектом, Комптон-ефектом і народженням електрон-позитронних пар відповідно. Енергія від джерела гамма-випромінювання, розташованого на відстані  $R$  від точки прийому, поширюється в радіальному напрямку, так що в точці прийому щільність потоку гамма-випромінювання

$$\text{дорівнює } \gamma_0 = \frac{I_0}{4\pi R^2} \left( \frac{M\Xi B}{\text{см}^2 \text{с}} \right).$$

У разі використання ефекту поглинання гамма-випромінювання для пошуку, виявлення і вимірювання положення джерел на місцевості щільність потоку гамма-випромінювання, який дійшов до детектора, має вигляд

$$\gamma_d = \frac{I_0 e^{-\mu(I_0)h}}{4\pi R^2} f_{\Pi}(I_0), \quad (2)$$

де  $f_{\Pi}(I_0)$  — енергетичний фактор накоплення для даної речовини, залежний від інтенсивності гамма-випромінювання та який враховує розсіювання гама-квантів при Комптон-ефекте. Даний фактор  $f_{\Pi}(I_0)$  визначається для поглинаючої речовини експериментально. З урахуванням (2) щільність потоку гама-випромінювання  $j$ , яка фіксується детектором записується як

$$j = \gamma_d(I_0) f_d(I_0) = \frac{I_0 e^{-\mu(I_0)h}}{4\pi R^2} f_{II}(I_0) f_d(I_0), \quad (3)$$

де  $f_d(I_0)$  – залежність рахункового числа від щільності потоку гамма-випромінювання для детектора. Передбачалося, що відстань між поглиначем і детектором у багато разів менше відстані до джерела гамма-випромінювання і його впливом на процес прийому гамма-квантів можна знехтувати. Не враховувалася також енергія іонізуючого випромінювання, поглинена в повітрі. Вираз (3) характеризує рівняння гамма-локації, коли ефект поглинання гамма-випромінювання використовується для виявлення і визначення напрямку на точкові джерела гамма-випромінювання.

Для визначення напрямку на точкове джерело гамма - випромінювання детектор X розташований в асиметричному поглиначу - «ракушці», товщина якого  $h_x$  лінійно змінюється в залежності від вимірюваного кута  $\alpha$ , що характеризує напрямком на джерело випромінювання

$$h_x = c_x + b_x \frac{\alpha}{360^0}, \quad (4)$$

де  $c_x$  – визначає мінімальну товщину поглинача для  $\alpha = 0^0$ , а  $b_x$  – максимальну товщину при  $\alpha = 360^0$ . Детектор Y розташований у центрі коаксіального циліндра-поглинача (КЦ) з постійною товщиною поглинача в діапазоні кутів  $2\pi$  радіан, яка дорівнює  $h_y = c_T$ . Підраховується відношення числа імпульсів на детекторах X і Y, яке має назву коефіцієнт пропорційності

$$K_{XY} = \exp[-\mu(h_x - h_y)] = \exp\left[-\mu\left(c_x - c_y + b_x \frac{\alpha}{360^0}\right)\right] = f_{XY}(\alpha). \quad (5)$$

Кожне конкретне значення відношення інтенсивності гамма-випромінювання, що вимірюються відповідними детекторами, тобто коефіцієнт пропорційності, однозначно зв'язане з напрямком на джерело гамма-випромінювання. Коефіцієнти пропорційності в теорії просторових вимірювань мають назву пеленгаційних характеристик, оскільки характеризують залежності чисел від пеленгу (напрямку) на джерело гамма-випромінювання [10, С. 163]. Коефіцієнт  $K_{XY}$  – теоретична пеленгаційна характеристика пристрою  $f_{XY}(\alpha)$ . Реальна пеленгаційна характеристика відрізняється від теоретичної наявністю зони невизначеності поблизу переходу товщини поглинача від максимальної до мінімальної  $(360-0)^0$ , де здійснюється зміна коефіцієнта пропорційності  $K_{XY}$  від максимального до мінімального, має місце неоднозначність, знак похибки невідомий. Тому вимірювання напрямку на джерело випромінювання з допомогою цих детекторів здійснюється в діапазоні кутів від  $5^0$  до  $355^0$  [1, С. 36].

Статистичні похибки вимірювання кута  $\alpha$  залежать від крутизни пеленгаційної характеристики  $K_{XY} = f_{XY}(\alpha)$ . Її диференціал є

$$dK_{XY} = f_{XY}^{(1)}(\alpha) d\alpha, \quad (6)$$

де  $f_{XY}^{(1)}(\alpha)$  – перша похідна функції  $f_{XY}(\alpha)$ . З виразу (6) слідує, що похибки вимірювання кута  $\Delta\alpha$  дорівнюють

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta K_{XY}}{f_{XY}^{(1)}(\alpha)}, \quad (7)$$

де  $\Delta K_{XY}$  – похибки вимірювання коефіцієнта пропорційності. З виразу (7) бачимо, що значення похибок  $\Delta\alpha$  зворотно пропорційні крутизни пеленгаційної характеристики  $K_{XY} = f_{XY}(\alpha)$ , яка згідно з (5) є експоненціальною функцією. Чим більше похідна, тим менше помилки вимірювання напрямку на джерело гамма-випромінювання. Вираз для похідної має вигляд

$$f_{XY}^{(1)} = -\mu \frac{b_x}{360^0} \exp\left[-\mu\left(c_x - c_y + b_x \frac{\alpha}{360^0}\right)\right]. \quad (8)$$

#### 4 Вибір матеріалу поглинача гама-випромінювання.

В якості поглиначів можливе використання сипучих матеріалів, лінійні коефіцієнти поглинання для яких наведені в таблиці 1 [11].

Таблиця 1. Лінійні коефіцієнти поглинання сипучих матеріалів

Матеріал	W, MeV		
	1	3	6
Цегла вогнетривка	0,129	0,0738	0,0543
Глина	0,13	0,0801	0,059
Цемент	0,133	0,076	0,0559
Пісок	0,14	0,0825	0,0578
Графіт	0,143	0,0801	0,065
Граніт	0,153	0,0887	0,0654
Вапняк	0,187	0,109	0,0824

Згідно з таблицею 1 лінійні коефіцієнти поглинання сипучих матеріалів незначно відрізняються один від одного, причому мають незначну величину. Метали мають більш величину цього показника (див. таблицю 2) [11, 12].

Таблиця 2. Лінійні коефіцієнти поглинання металів

Матеріал	W, MeV		
	1	3	6
Алюміній	0,165	0,095	0,0725
Сталь	0,46	0,276	0,234
Залізо	0,471	0,284	0,242
Свинець	0,798	0,475	0,493

Здійснено порівняння похідних пеленгаційних характеристик (вираз 6) в випадку використання як поглиначі-графіту, заліза, свинця. В таблиці 3 наведені значення коефіцієнтів лінійного поглинання для свинця, заліза та графіту для діапазону енергії гамма-випромінювання від 0,1 до 50 MeV [12].

Таблиця 3. Значення коефіцієнтів лінійного поглинання  $\mu$

W, MeV		0,1	0,5	1,0	5,0	10	50
$\mu$ , см <sup>-1</sup>	свинець	65	1,8	0,798	0,48	0,552	0,915
	залізо	2,51	0,661	0,471	0,247	0,233	0,299
	графіт	0,342	0,196	0,143	0,0603	0,0439	0,032

Для свинця мінімальне значення  $\mu_{\min} = 0,472$  см<sup>-1</sup> має місце при 4 MeV, для заліза  $\mu_{\min} = 0,233$  см<sup>-1</sup> — при 8,0–10,0 MeV, для графіту  $\mu_{\min} = 0,032$  MeV — при 40–50 MeV. Вважаємо  $c_x = c_y$ ,  $b_x = 6$  см [7, С. 6].

Результати розрахунків за виразом (8) наведені в таблиці 4.

Таблиця 4. Значення похідних пеленгаційних характеристик

W, MeV	0,1	0,5	1,0	5,0	10	50
Свинець	$\frac{0,0048}{10^{-167}}$	$\frac{0,0258}{7 \cdot 10^{-5}}$	$\frac{0,0124}{1,18 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,00769}{4,67 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,00879}{3,51 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,01413}{7,4 \cdot 10^{-5}}$
Залізо	$\frac{0,038}{1,6 \cdot 10^{-9}}$	$\frac{0,0104}{2,2 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,00755}{4,84 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,004}{9,54 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,0038}{6,55 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0,00496}{8,5 \cdot 10^{-4}}$
Графіт	$\frac{0,0055}{7,5 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,0032}{10,24 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,00235}{10,22 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,001}{7,0 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,00073}{5,6 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,00053}{4,4 \cdot 10^{-4}}$

В таблиці 4 в чисельниках наведені значення похідних для кутів  $\alpha = 0^{\circ}$ , а в знаменнику — для  $\alpha = 355^{\circ}$ , тобто для меж діапазону вимірювань. Оскільки пеленгаційна характеристика є експоненціальною функцією зрозуміло, що мінімальні значення похідна має місце для напрямків  $\alpha$  в кінці діапазону вимірювань. В випадку одної пари детекторів X і Y значення похідних різняться суттєво. З ростом енергії джерела гамма-випромінювання збільшується відношення сигнал/шум, як наслідок, зменшуються статистичні помилки вимірювань. Тому вибір типу поглинача доцільно здійснювати для мінімальних значень цієї енергії. Якщо  $W_{\text{мін}} = 0,1$  МеВ, поглинач-залізо має більшу похідну в порівнянні з поглиначом-графітом лише в діапазоні кутів  $5^{\circ} - \alpha_1^{\circ}$ . Значення кута знайдемо з рівняння

$$2,91 \frac{6}{360} \exp(2,91 \times 6 \times \alpha_1 / 360) = 0,342 \frac{6}{360} \exp(0,342 \times 6 \times \alpha_1 / 360). \quad (9)$$

Ліва частина рівняння (9) — похідна для поглинач-заліза при  $\alpha_1$ , а права — поглинач-графіту при  $\alpha_1$ . Після перетворень маємо

$$\alpha_1 = \frac{\ln 8,509}{0,0428} = 50^{\circ}. \text{ В діапазоні кутів від } 50^{\circ} \text{ до } 355^{\circ} \text{ більшу похідну забезпечує поглинач-}$$

графіт. Оскільки цей діапазон в  $305^{\circ}/45^{\circ} \cong 6,8$  раз більше наступного перевагу слід віддати поглиначу-графіту.

Після вибору типу поглинача необхідно здійснювати вибір його параметрів. В роботі [7] для пристрою вибрані значення  $c = 10$  мм,  $b = 60$  мм. Наявність виразу (8) дозволяє знайти оптимальне значення  $b_x$ , яке забезпечує максимальне значення похідної на дальній межі діапазону вимірювань  $\alpha = 355^{\circ}$ . Для цього потрібно розв'язати рівняння

$$\frac{df_{XY}^{(1)}}{db_x} = 0. \quad (10)$$

$$\text{Маємо} \quad b_x^{\text{опт}} = \frac{360}{\mu \cdot \alpha}. \quad (11)$$

Для графіту при  $W = 0,1$  МеВ  $\mu = 0,342$  см<sup>-1</sup>. Для  $\alpha = 355^{\circ}$  маємо  $b_x^{\text{опт}} \cong 30$  мм, а максимальне значення крутизни пеленгаційної характеристики дорівнює  $0,342 \frac{3}{360} \exp(-0,342 \frac{3 \times 355}{360}) = 0,001036$ . Вона в  $0,001036/0,00075 = 1,38$  разу більше ніж при  $b_x = 60$  мм.

Головне, що значно більше збільшується енергія сигналу, так як втрати в поглиначі зменшуються в  $\exp(-0,342 \frac{3}{360} 355) / \exp(-0,342 \frac{6}{360} 355) = \exp(-1,01175) / \exp(-2,235) = 2,75$  разу. Крім того, знижуються масо-габаритні характеристики пристрою.

### 5 Обґрунтування вибору напівпровідникового CdZnTe детектора.

Наступним елементом пристрою, який потребує обґрунтування, є напівпровідниковий детектор (НПД). У сучасній науково-технічній літературі детально розглянуті питання застосування НПД в спектрометрії, радіометрії, дозиметрії. Цього не можна сказати, якщо прилад призначений для вирішення завдань координатометрії. В випадку координатометрії до НПД пред'являються такі вимоги:

Забезпечення необхідних операційних властивостей, тобто зручності роботи з ним;

Володіння необхідними електрофізичними характеристиками, такими, як висока ефективність реєстрації гама-випромінювання, максимально можлива площа робочої зони, максимально можливий показник  $f_d(I_0)$ , мінімально можливий енергетичний еквівалент шуму;

Ці вимоги визначаються необхідності забезпечення максимального співвідношення сигнал/шум при проведенні вимірювань. Крім того, потрібна оперативність вимірювань і приємлемі масо-габаритні характеристики.

Матеріалом для виготовлення напівпровідникових детекторів (НПД), які реєструють гамма-випромінювання, є германій, кремній і двокомпонентні напівпровідникові кристали, які мають широку заборонену зону. Відомі в літературі основні фізичні характеристики цих матеріалів наведені в таблиці 5 [13, 14].

Таблиця 5. Фізичні властивості деяких напівпровідникових матеріалів

Матеріал	Атомний номер $Z$	Щільність, $\text{г/см}^3$	Робоча температура, К	Ширина забороненої зони, еВ	Середня енергія на пару, еВ	Дрейфова рухливість, $\mu$ , $\text{см}^2/\text{В с}$		Середній час життя $\tau$ , с	
						Електрон	Дірка	Електрон	Дірка
Si	14	2,33	300	1,12	3,61	1350	480	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Ge	32	5,32	77	0,74	2,98	$3,6 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
GaAs	31;33	5,36	300	1,4	4,2	8600	400	$10^{-8}$ – $10^{-9}$	$10^{-8}$ – $10^{-9}$
GaSe	31;34	4,55	300	2,03	6,3	60	215	$1,6 \cdot 10^{-9}$ $2,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-10}$ $7 \cdot 10^{-9}$
CdTe	48;52	6,06	300	1,47	4,43	1100	100	$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$
HgI <sub>2</sub>	80;53	6,40	300	2,13	4,2	100	4	$10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$
PbI <sub>2</sub>	82;53	6,16	300	2,6	7,68	8	2	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$10^{-8}$
AlSb	13;51	4,26	300	1,62	5,055	1200	700	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$

З урахуванням першої вимоги зі списку можливих матеріалів можна виключити Ge, оскільки за наведеними характеристиками він має ці характеристики при температурі рідкого азоту, а розроблювальний пристрій має бути переносним, компактним. Крім GaAs, CdTe, HgI<sub>2</sub> інші щірокозонні напівпровідникові матеріали, будучи перспективними для виготовлення охолоджуваних НПД, поступаються перерахованим в ступеня опрацювання і в порівнянні з ними знаходяться в початковій стадії практичного використання [13, С.120]. Тому перелік можливих матеріалів далі обмежимо рамками 4-х матеріалів: кремній (Si), діодид ртуті (HgI<sub>2</sub>), арсенід галію (GaAs), телурид кадмію (CdTe). Висока ефективність реєстрації гамма-випромінювання передбачає виконання умов:

Трек частки повинен повністю укладатися в чутливої області НПД;

Нерівноважні заряди, які генеруються  $\gamma$  - частинкою, повинні повністю збиратися на електродах, завдяки чому забезпечується пропорційність сигналу на виході електричної частини пристрою.

Щоб виконати зазначені умови матеріал для виготовлення НПД повинен мати певні властивості. По-перше, при взаємодії частинки з речовиною має утворюватися велика кількість вільних носіїв зарядів. При реєстрації квантів ефектом першого порядку є іонізаційний процес, пов'язаний з утворенням в речовині НПД електрон-діркових пар. Величина імпульсу струму в зовнішньому ланцюзі пропорційна  $E$ , якщо всі носії збираються на відповідному електроді. Якщо збирається число зарядів менше  $N$ , прийнятого за 100%, сигнал зменшується.

Повне число нерівновіжних носіїв  $N$  у треку дорівнює

$$N = E / \varepsilon, \quad (12)$$

де  $E$  — енергія, яка втрачається частинкою в об'ємі НПД;  $\varepsilon$  — енергія, необхідна для створення одної електрон-діркової пари. Отже, вибрати треба речовину, в якій  $E$  максимальна. Якість

детекторних структур, яка розглядається, характеризується параметром, званим «ефективністю реєстрації» [15]. Коли на детектора з робочою поверхнею  $S$  в одиницю часу впливає випромінювання з інтенсивністю  $I_0$ , число поглинених квантів дорівнюватиме

$$N_{II} = I_0 [1 - \exp(-\mu d_{II})] S t, \quad (13)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт поглинання випромінювання речовиною НІД,  $d_{II}$  — товщина шару поглинання. Щоб мати дорій показник  $N_{II}$ , матеріал НІД повинен мати високий атомний номер  $Z$  і щільність  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>), тому, як перетин фото ефекту збільшується як  $Z^n$  ( $n=3,5-5$ ) і пропорційно щільності  $\rho$  [16]. Из таблиці 5 випливає, що кремній (Si) з цих параметрів уступає бінарним матеріалам. цей недолік кремнію може бути компенсовано підвищенням товщини шару поглинання  $d_{SI}$ . Це має місце, коли виконується умова  $d_{SI} \geq \frac{\mu_a}{\mu_{SI}} d_a$ , де  $\mu_a$ ,  $d_a$  —

коефіцієнт поглинання і товщина шару поглинання альтернативного матеріалу відповідно. Наприклад, у порівнянні з телуриду кадмію (CdTe) товщина шару поглинання повинна бути більше в  $6.06/2.33 = 2,6$  разів.

Як випливає з (12), для збільшення ефективності реєстрації повинна  $\varepsilon$  бути мінімальною. Згідно з даними таблиці 5 кремній має найменшу середньої енергією  $\varepsilon$ , що витрачається на появу однієї електрон-діркової пари, яка дорівнює 3.61 eV, в порівнянні з бінарними матеріалами. Нерівноважні носії з треку дрейфують до відповідних електродів, так як до НІД прикладена різниця потенціалів. Під час цього руху пакетів електронів і дірок частина носіїв рекомбінують або захоплюється центрами прилипання. Це призводить до втрат, які визначаються, в основному, чистотою матеріалу. Глибина проникнення електричного поля в структуру НІД при наявності потенційного бар'єру і постійної концентрації фонових домішок дорівнює [15, С.157]

$$d_{II}^{max} = 3,5 \cdot 10^3 \sqrt{U / N_{\phi}}, \quad (14)$$

де  $U$  — напруга зміщення. Чистота матеріалу обмежує товщину чутливого шару матеріалу детектора, так як концентрація залишкових фонових домішок  $N_{\phi}$  задає форму розподілу поля в структурі. Тому чисті матеріали мають завжди перевагу за значенням  $d_{II}^{max}$  перед іншими. Якщо в порівнянні з будь-якими перспективними бінарними матеріалами за рахунок збільшення шару поглинання кремнію не вдається забезпечити більш високу ефективність реєстрації в дію вступає другий фактор — площа робочої поверхні  $S$ . Даний параметр в порівнянні з бінарними матеріалами має велику величину і може досягати 500 мм<sup>2</sup> [17]. Довжина пробігу носіїв, що досягають електродів і вносять вклад в сумарний наведений струм, характеризується дрейфовими довжинами електронів  $L_n$  і дірок  $L_p$ , які дорівнюють

$$L_n = v_n \cdot \tau_n, \quad L_p = v_p \cdot \tau_p, \quad (15)$$

де  $v_n = \eta_n \cdot \xi$  і  $v_p = \eta_p \cdot \xi$  — усереднені дрейфові швидкості, що визначаються рухливістю електронів  $\eta_n$  і дірок  $\eta_p$  за умови рівномірного розподілу електричного поля,  $\xi(x) = const$ ,  $\tau_n$  і  $\tau_p$  — час життя електронів і дірок відповідно. Від довжини пробігу носіїв залежить ще один показник, який носить назву «ефективність збору заряду» (в зарубіжній літературі CCE — charge collection efficiency). Для плоского конденсатора ймовірність збору електрон-діркових пар, сформованих в довільній точці від катода, становить [15, формула 4]

$$CCE = \frac{1}{d} \left\{ L_n \left[ 1 - \exp\left(-\frac{d-x}{L_n}\right) \right] + L_p \left[ 1 - \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) \right] \right\}. \quad (16)$$

Якщо виконується умови  $L_n \gg d$  і  $L_p \gg d$  експоненту в (16) можна розкласти в ряд, обмежившись першими членами розкладання. Отримаємо:



$$CCE \rightarrow \frac{L_n}{d} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{d-x}{L_n} \right) \right] + \frac{L_p}{d} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{L_p} \right) \right] = \frac{d-x}{d} + \frac{x}{d} = 1 \quad (17)$$

У «чистому» кремнії час життя електронів і дірок однакові за величиною (згідно табл. 5 = 10<sup>3</sup>с) і значно перевершують аналогічні показники інших матеріалів. Тому виконуються умови  $L_n \gg d$  і  $L_p \gg d$ , і ступінь наближення CCE до 1 для чистого кремнію вище, ніж для інших матеріалів.

Помилки вимірів при координатометрії залежать від відношення сигнал / шум, тобто не тільки від рівня сигналу, але і рівня шуму. Цей рівень характеризується еквівалентним шумовим зарядом (ENC в зарубіжній літературі), який враховує, як власні НПД, так і шуми електричної частини вимірювального пристрою. В якості першого елемента такої частини, як правило, використовується зарядочутливий попередній підсилювач (ЗЧПП). Він інтегрує вхідний струм, і перетворює його в вихідну напругу, пропорційну заряду, залишеному  $\gamma$ -квантом в детекторі. Сигнал з підсилювача подається на формуючий підсилювач для подальшого посилення і формування по формі та тривалості.

Еквівалентний шумовий заряд  $\sigma_q$  визначається статистично незалежними паралельним і послідовним шумами. Величина першого з них в системі НПД - ЗЧПП залежить від темнового струму детектора, а другого — від ємностей детектора і рівня шумів підсилювача. Енергетичний еквівалент вхідного шуму  $\sigma_E$  (эВ) визначається як

$$\sigma_E (\text{эВ}) = \sigma_q (\text{електронов}) \cdot \varepsilon \left( \frac{\text{эВ}}{\text{пара}} \right). \quad (18)$$

Для кремнія середня енергія, що витрачається на народження однієї електрон-діркової пари, дорівнює 3.61 еВ, менша в порівнянні з бінарними матеріалами. У спектрометрії для оцінки рівня шумів частіше використовують не ENC, а ширину розподілу на рівні 0,5 максимального значення <sup>1/2</sup> $\Delta_E$  (за кордоном NLW або FWHM) [13, С. 158]

$$^{1/2}\Delta_E = 2,35 \cdot \sigma_E. \quad (19)$$

Порівняльний теоретичний і експериментальний аналіз ефективності ППД на GaAs і Si проведено в [19]. Встановлено, що фотоелектричне посилення GaAs НПД порівняно з аналогічними параметрами зразків промислових НПД з високоомного Si. Але приладові характеристики Si НПД (еквівалентний енергетичний шум ENC  $\approx$  2 кеВ, енергетичний дозвіл FWHM  $\approx$  10 кеВ) при кімнатній температурі вище, ніж у кращого зразка GaAs ППД з «чистого» шару арсеніду галію (концентрація електронів  $\approx$  10<sup>13</sup> см<sup>-3</sup>) з *p-n* переходом в оптимальному режимі збіднення ( $\approx$  30 В), що має ENC  $\approx$  8,3 кеВ, FWHM  $\approx$  15,1 кеВ. При таких рівнях шумів вигреш у відношенні сигнал / шум при використанні Si ППД залишає 6 дБ, що призводить до збільшення дальності виявлення джерела  $\gamma$ - випромінювання в 2 рази.

В роботі [16] проведено експериментальне дослідження CdTe і CdZnTe НПД для вимірювання рентгенівського і  $\gamma$ - випромінювання. Показано, що струми витоку, що визначають рівень шуму, для CdZnTe НПД значно менше в порівнянні з CdTe НПД (для електронів — 26 нА проти 95 нА; для дірок — 2,3 нА проти 8.6 нА). Це означає, що по еквівалентному енергетичному шуму ENC CdZnTe НПД має перевагу перед CdTe НПД. Реальний рівень технології на той час дозволив отримати енергетичну роздільну здатність FWHM близько 70 кеВ (енергетичний еквівалент шуму біля 70 / 2,35 = 29,8 кеВ) при FWHM для електроніки близько 7 кеВ.

Таким чином, кремній, як матеріал для НПД, за показниками ефективності реєстрації випромінювання, збору заряду (CCE) і енергетичному еквіваленту вхідного шуму перевищує бінарні матеріали і кращий при вирішенні задач координатометрії в разі низької енергії реєстрованих  $\gamma$ -квантів.

Відомий иполнненний по планарной технології сенсор іонізуючого випромінювання на основі кремнію бестигельной зонного плавлення *p*-типу провідності. Він чутливий до всіх видів іонізуючих випромінювань, крім нейтронів. Нижня межа енергії реєстрованих частинок не

більше 1000 еВ, і практично визначається рівнем шумів електроніки. Середня величина іонізаційних втрат становить 388 еВ / мкм (для сенсора товщиною 500 мкм — 194 кеВ) [20].

У разі реєстрації квантів високих енергій ситуація змінюється, так як кремній менш радіаційностійкий в порівнянні з бінарними матеріалами. Радіаційні пошкодження створюються швидкими електронами, що народжуються в результаті фотопоглинання, комптонівського розсіювання і народження електрон-діркових пар. Представлений в таблиці 5 йодид ртуті (HgI<sub>2</sub>) в порівнянні, наприклад, з телуридом кадмію CdTe (або CdZnTe) краще протистоїть опроміненню нейтронами і протонами [18]. Однак, йому притаманні суттєві недоліки, які перешкоджають широкому використанню його на практиці. До них відносяться низька рухливість носіїв, низька температурна стійкість, мала механічна міцність та інші. З цієї причини вибір необхідно робити з двох матеріалів: GaAs і CdZnTe.

Арсенід галієві НПД можуть бути виконані на основі напівізолюваному і високоомного GaAs. Такі НПД виявилися придатними тільки для реєстрації частинок [13, С. 106]. Більш перспективними вважаються НПД на основі компенсованого GaAs, в яких матеріал вирощується методом високотемпературної дифузії, жидкофазовою і газофазовою епітаксії [20]. Розроблено оригінальні технології вирощування методом жидкофазовою епітаксії шарів напівізолюючих GaAs детекторної якості. Отримано  $p-i-n$  діоди з низькою щільністю зворотного  $j(-100\text{ В}) = 10^{-7}\text{ А/см}^2$ . Це в кілька разів менше, ніж у дифузних структур. У порівнянні з останньою у них при однаковій товщині активної частини більш високі значення часу життя нерівноважних електронів і дірок. Товщина чутливої області НПД на основі чистих епітаксійних шарів не перевищує 40 мкм, а на основі епітаксійних шарів з введенням методом дифузії хрому — до 240 мкм. Щільність зворотного потоку для більшості таких НПД при напрузі - 100 В становить  $(1.5-5) \cdot 10^{-7}\text{ А/см}^2$  [21].

За товщиною епітаксійних шарів GaAs НПД поступаються CdZnTe НПД і використовуються, найчастіше, в спектрометрії -випромінювання низьких енергій [13, С. 106]. Крім невеликої товщини, недоліком НПД на основі GaAs є також мала робоча поверхня, а це важливий фактор для координатометрії. Є ще одна причина, по якій перевагу слід віддати CdZnTe. GaAs в більшій мірі схильний до деградації від частини випромінювання, зумовленої нейтронами і протонами [18, С. 59]. А це цілком можливо при координатометрії, наприклад, ядерних вибухів.

Опромінення CdTe і CdZnTe НПД  $\gamma$  - квантами <sup>60</sup>Co з потужністю дози 1940 Гр / год проведено в [22, 23]. Виявилося, що НПД малочутливі до опромінення доз в 10 кГр. Деградація спектрометричних властивостей настає при дозі, що дорівнює  $\approx 30$  кГр. До цієї верхньої межі спектрометрические характеристики CdTe знижуються приблизно за лінійним законом. Більш детально визначення радіаційного ресурсу НПД на основі широкозонних CdTe (CdZnTe) НПД проведено в [18]. Експериментально встановлено, що деградація CdTe при  $\gamma$  - опромінення починається з доз менших, ніж для CdZnTe. Величини граничних доз поглинання  $\gamma$  - випромінювання, при якій характеристики НПД неприйнятно змінюються, складають приблизно 200 кГр і 800 кГр для дозиметрів на основі CdTe і CdZnTe відповідно.

## 6 Висновки

Наведені дані дозволяють стверджувати, що в разі координатометрії джерел  $\gamma$  - випромінювання у широкому діапазоні енергій в якості матеріалу НПД оптимальним є CdZnTe. В Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» розроблені, виготовлені та експериментально досліджені CdZnTe НПД  $\gamma$  - випромінювання, енергетичний діапазон яких становить від 20 до 3000 кеВ, діапазон робочих температур — від -40 до +50 0С, енергетичної дозвіль — порядку декількох відсотків [24, 25].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Григор'єв О. М. Дослідження способів локації джерел проникаючих ядерних випромінювань / О. М. Григор'єв, Л. Б. Беденко, О. В. Сакун, С. М. Коваленко // Системи озброєння і військова техніка, 2006. – випуск 4(8). – С. 33–37.

2. Спосіб визначення напрямку на імпульсні джерела гамма-випромінювання : Патент UA 108262, G21J 5/00. / О. М. Григор'єв, З. В. Білик, О. В. Сакун, В. В. Марущенко – u 2013 05335 ; опубліковано 10.04.2015. Бюл. № 7.
3. Пристрій для визначення напрямку в просторі на точкові постійні та імпульсні джерела гамма-випромінювання : Патент UA 85493 U, G01T 1/16, G01T 1/167, G01T 1/169, G21J 5/00 / О. М. Григор'єв, З. В. Білик, О. В. Сакун, В. В. Марущенко – u 2013 05331 ; опубліковано 25.11.2013. Бюл. №22.
4. Григор'єв О. М. Визначення напрямку на джерело проникаючих ядерних випромінювань. Інформаційний бюлетень військ РХБ захисту № 1(5), 2007 / О. М. Григор'єв, Л. Б. Беденко, О. В. Сакун // — Науково-інформаційне видання. — Харків: ХГТВ, 2007. — 112 с.
5. Білик З. В. Визначення напрямку на імпульсне гамма-джерело з використанням сферичного поглинача / З. В. Білик, О. М. Григор'єв, Ю.В. Литвинов, М. Є. Полянський, О. В. Сакун, В. В. Марущенко, І. Ю. Чернавський // Х.: Вісник НТУ «ХП», 2017. — № 4 (1226). — С. 89–94.
6. Чернавский И. Ю. Определение направления на источник проникающих ядерных излучений в условиях неравномерного радиоактивного загрязнения / И. Ю. Чернавский // Сборник статей по материалам всероссийской научно-практической конференции с международным участием // ФГБОУ ВПО Воронежский институт ГПС МЧС России. — Воронеж, 2013. — 404 с.
7. Білик З. В. Метод та засіб контролю для визначення напрямку на точкові джерела гамма-випромінювання / З. В. Білик // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. — Харків: НТУ «ХП», 2017. — 21 с.
8. Григор'єв О. М. Діючий макет пристрою для підвищення захисту танка від металюї дії ударної хвилі та гамма-випромінювання ядерного вибуху / О. М. Григор'єв, З. В. Білик, О. В. Сакун, В. В. Марущенко // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ : Матеріали міжнародної наук.-техн. конф. — Львів : АСВ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, 2013. — С. 207–208.
9. Чернавский И. Ю. Оценка степени радиационного поражения путем прогнозирования дозовых нагрузок по данным датчика боеспособности / И, Ю, Чернавский, В. В. Марущенко, А. В. Матыкин // — Системи озброєння і військова техніка, 2016. —№1(45). — С. 196–202.
10. Сайбель А. Г. Основы радиолокации / А. Г. Сайбель // — М.: «Советское радио», 1961. — 384 с.
11. Линейный коэффициент ослабления гамма-излучения [Электронный ресурс] <https://www.studfile.net/previen/17021642/page>
12. Коэффициент ослабления гамма-излучения, калькулятор [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.cali.ru/153html> .
13. Акимов Ю. К. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю. К. Акимов, О. В. Игнатъев, А. И. Калинин, В. Ф. Кушнерук // — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 344 с.
14. Полупроводниковые детекторы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://chemanalytica.com/book/novyy\\_spravochnik\\_khimika\\_i\\_tekhnologa/11\\_radioaktivnye\\_veshchestva\\_vrednye\\_veshchestva\\_gigienicheskie\\_normativy/5135](http://chemanalytica.com/book/novyy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/11_radioaktivnye_veshchestva_vrednye_veshchestva_gigienicheskie_normativy/5135)
15. Толбанов О. П. Детекторы ионизирующих излучений на основе компенсированного арсенида галлия / О. П. Толбанов // — Томск: Вестник Томского государственного университета, 2005. — С. 155–163. [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/detektory-ioniziruyuschih-izlucheniya-na-osnove-kompensirovannogo-arsenida-galliya>
16. Прохорец И. М. Моделирование и экспериментальное исследование CdTe (CdZnTe) детекторов измерения рентгеновского и -излучений [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-eksperimentalnoe-issledovanie-cdte-cdznte-detektorov-dlya-izmereniya-rentgenovskogo-i-gamma-izlucheniya/viewer>
17. Бараночников М. Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник. Часть 1 / М. Л. Бараночников // — Электронная версия. — Москва, 2017. — С. 123–161 [Электронный ресурс] — Режим доступа: [www.radioliga.com/Books/pdi2\\_1PDF](http://www.radioliga.com/Books/pdi2_1PDF) .
18. Давыдов Л. Н. Радиационная стойкость полупроводниковых детекторов корпускулярного и гамма-излучения / Л. Н. Давыдов, А. А. Захарченко, Л. В. Кутний и др.// — Харків: Вісник

- Харківського університету, № 657, серія фізична «Ядра, частинки, поля», вип.1 (26), 2005. — С. 3—21.
19. Беспалов В. А. Электрофизические свойства GaAs слоев и особенности характеристик детекторов частиц высоких энергий на их основе / В. А. Беспалов, А. В. Воронцов, А. А. Горбацевич и др. // [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/ioffe/ztf/2004/03/ztf\\_t74v03\\_06.pdf](http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/ioffe/ztf/2004/03/ztf_t74v03_06.pdf)
  20. Елин В. А. Сенсор ионизирующего излучения на основе кремния бестигельной зонной плавки типа проводимости / В. А. Елин, М. М. Меркин//— Международный патент W 02017200416A1, МПК H01L31/117. Заявлено 08.05.2016 (RU2016119242A), опубликовано 23.11.2017. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/WO2017200416A1/ru>
  21. Воробьев А. П. Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений на арсениде галлия. Автореферат на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. — Протвино: Институт физики высоких энергий, 2005. — 28 с.
  22. Gavallini A., Fraboni B., Chirco P. et al. Electronic properties of traps induced by  $\gamma$ -irradiation in CdTe and CdZnTe detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. — 2000. — V. 448. — P. 558—566.
  23. Gavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Radiation effects on II—VI compound-based detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. — 2002. — V. 476. — P. 770—778.
  24. Кутний В. Е. Разработка дозиметрических и спектрометрических блоков регистрации гамма-излучения на основе полупроводниковых соединений CdTe (CdZnTe) для АЭС Украины / В. Е. Кутний, А. В. Рыбка, Д. В. Кутний и др. // — Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение», 2004. — № 3. — С. 96—100.
  25. Детекторы ионизирующих излучений на основе теллурида кадмия - цинка: Монография/ В.Е. Кутный, А.В. Рыбка, Л.Н. Давыдов и др. — Харьков:Типография Мадрид, 2021. -352 с. ISBN 978-617-7988-21-1 .

#### REFERENCES

1. Grigoriev O.M. Research of methods of location of sources of penetrating nuclear radiation / O.M. Grigoriev, L.B. Bedenko, O.V. Sakun, S.M. Kovalenko // Weapons systems and military equipment, 2006. - issue 4 (8). - P. 33—37. [in Ukrainian]
2. A method of determining the direction of pulsed gamma radiation sources: Patent RU 108262, G21J 5/00. / OM Grigoriev, ZV Bilyk, OV Sakun, VV Marushchenko - u 2013 05335; published on April 10, 2015. Bull. № 7. [in Ukrainian]
3. Device for determining the direction in space on point constant and pulsed gamma radiation sources: Patent RU 85493 U, G01T 1/16, G01T 1/167, G01T 1/169, G21J 5/00 / OM Grigoriev , ZV Bilyk, OV Sakun, VV Marushchenko - u 2013 05331; published 25.11.2013. Bull. №22. [in Ukrainian]
4. Grigoriev OM Determining the direction to the source of penetrating nuclear radiation. Information bulletin of the RHB protection troops № 1 (5), 2007 / OM Grigoriev, LB Bedenko, OV Sakun // — Scientific and information publication. — Kharkiv: KhGTV, 2007. — 112 p. [in Ukrainian]
5. Bilyk ZV Determination of the direction of a pulsed gamma source using a spherical absorber / ZV Bilyk, OM Grigoriev, Yu.V. Litvinov, ME Polyansky, OV Sakun, VV Marushchenko, I. Yu. Chernavsky // Kh. : Bulletin of NTU "KhPI", 2017. - № 4 (1226). - P. 89—94. [in Ukrainian]
6. Chernyavsky I. Yu. Determination of the direction to the source of penetrating nuclear radiation in conditions of uneven radioactive contamination / I. Yu. Chernyavsky // Collection of articles based on the materials of the All-Russian scientific-practical conference with international participation // Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia. — Voronezh, 2013. — 404 p. [in Russian].
7. Bilyk ZV Method and means of control to determine the direction of point sources of gamma radiation / ZV Bilyk // Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Specialty 05.11.13 - devices and methods of control and determination of the composition of substances. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. - 21 p. [in Ukrainian]
8. Grigoriev OM The current model of the device for increasing the protection of the tank from the metal action of the shock wave and gamma radiation of a nuclear explosion / OM Grigoriev, ZV

- Bilyk, OV Sakun, V. V. Marushchenko // Prospects for the development of armaments and military equipment of the land forces: Materials of the international scientific and technical. conf. — Lviv: DIA named after Hetman Peter Sagaidachny, 2013. — P. 207–208. [in Ukrainian]
9. Chernavskiy I. Yu. Assessment of the degree of radiation damage by predicting dose loads according to the combat capability sensor / I, Yu, Chernavskiy, V. V. Marushchenko, A. V. Matykin // — Systems of health and safety, 2016. — № 1 (45). — S. 196–202. [in Russian].
  10. Saybel A. G. Fundamentals of radar / A. G. Saybel // - M.: "Soviet radio", 1961. 384 p. [in Russian].
  11. 11. Linear attenuation coefficient of gamma radiation <https://www.studfile.net/previen/17021642/> [in Russian]
  12. Attenuation coefficient of gamma radiation, calculator [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.cali.ru/153html>. [in Russian]
  13. 13. Akimov Yu. K. Semiconductor detectors in experimental physics / Yu. K. Akimov, OV Ignatiev, AI Kalinin, V. F. Kushneruk // — M.: Energoatomizdat, 1989. — 344 p. [in Russian]
  14. Semiconductor detectors [Electronic resource]. — Access mode: [http://chemanalytica.com/book/novyj\\_spravochnik\\_khimika\\_i\\_tekhnologa/11\\_radioaktivnye\\_veshchestva\\_vrednye\\_veshchestva\\_gigienicheskie\\_normativy/5135](http://chemanalytica.com/book/novyj_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/11_radioaktivnye_veshchestva_vrednye_veshchestva_gigienicheskie_normativy/5135)
  15. Tolbanov OP Detectors of ionizing radiation on the basis of compensated gallium arsenide / OP Tolbanov // — Tomsk: Bulletin of Tomsk State University, 2005. — P. 155–163. [Electronic resource] — Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/detektory-ioniziruyuschih-izlucheniya-na-osnove-kompensirovannogo-arsenida-galliya> [in Russian]
  16. Prokhorets IM Modeling and experimental study of CdTe (CdZnTe) detectors for measuring X-ray and  $\gamma$ -radiation [Electronic resource] — Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-eksperimentalnoe-issledovanie-cdte-cdznte-detektorov-dlya-izmereniya-rentgenovskogo-i-gamma-izlucheniya/viewer> [in Russian]
  17. Baranochnikov ML Receivers and detectors of radiation. Directory. Part 1 / M. L. Baranochnikov // — Electronic version. — Moscow, 2017. — P. 123–161 [Electronic resource] — Access mode: [www.radioliga.com/Books/pdi2\\_1PDF](http://www.radioliga.com/Books/pdi2_1PDF). [in Russian]
  18. Davydov L. N. Radiation resistance of semiconductor detectors of corpuscular and gamma radiation / L. N. Davydov, A. A. Zakharchenko, L. V. Kutniy et al. physical "Kernels, particles, fields", vip. 1 (26), 2005. — P. 3-21. [in Russian]
  19. Bespalov VA Electrophysical properties of GaAs layers and characteristics of high-energy particle detectors based on them / VA Bespalov, AV Vorontsov, AA Gorbatshevich et al. // [Electronic resource]. — Access mode: [http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/ioffe/ztf/2004/03/ztf\\_t74v03\\_06.pdf](http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/ioffe/ztf/2004/03/ztf_t74v03_06.pdf) [in Russian]
  20. Elin V. A. Ionizing radiation sensor based on crucible-free zone melting of conductivity type / V. A. Elin, M. M. Merkin // — International patent W 02017200416A1, IPC H01L31 / 117. Stated 05/08/2016 (RU2016119242A), published 11/23/2017. [Electronic resource]. — Access mode: <https://patents.google.com/patent/WO2017200416A1/ru> [in Russian]
  21. Vorobiev A. P. Semiconductor detectors of ionizing radiation based on gallium arsenide. Abstract for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences. — Protvino: Institute of High Energy Physics, 2005. — 28 p. [in Russian]
  22. Gavallini A., Fraboni B., Chirco P. et al. Electronic properties of traps induced by  $\gamma$ -irradiation in CdTe and CdZnTe detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. — 2000. — V. 448. — P. 558–566.
  23. Gavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Radiation effects on II–VI compound-based detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. — 2002. — V. 476. — P. 770–778.
  24. Kutniy V. E. Development of dosimetric and spectrometric gamma-radiation registration units based on semiconductor compounds CdTe (CdZnTe) for Ukrainian NPPs / V. E. Kutniy, A. V. Rybka, D. V. Kutniy et al. // — Questions of atomic science and technology. Series; "Physics of radiation damage and radiation materials science", 2004. — No. 3. — P. 96–100. [in Russian]
  25. Ionizing radiation detectors based on cadmium-zinc telluride: Monograph / V.E. Kutny, A.V. Rybka, L.N. Davydov and others - Kharkiv: Printing House Madrid, 2021.-352 p. ISBN 978-617-7988-21-1. [in Russian]