

**М.С. Бродин¹, В.Т. Весна¹,
В.Я. Дегода¹, І.Л. Зайцевський², Б.В. Кожушко¹**

¹ Інститут фізики НАН України, Київ

² Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, Київ

ДВОЕНЕРГЕТИЧНИЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНІВСЬКОГО ТА ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ



Проведено короткий аналіз основних типів детекторів іонізуючого випромінювання, їхніх переваг та недоліків. Обґрунтовано вибір та застосування напівпровідникового детектора на основі ZnSe при підвищених температурах. Використані оригінальні форми зразків детекторів із селеніду цинку та двокристална схема для реєстрації рентгенівського та гамма-випромінювання в широкому діапазоні енергій. На виготовленому макеті приладу продемонстрована можливість реєстрації гамма-квантів за допомогою високоомного детектора із ZnSe в режимі окремих імпульсів.

Ключові слова: рентгенівське і гамма-випромінювання, напівпровідниковий детектор, монокристал селеніду цинку, зарядочутливий підсилювач.

1. ОСНОВНІ ТИПИ ДЕТЕКТОРІВ, ЇХ ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ

Загальновідомо, що для оперативного визначення величини інтенсивності (густини потоку енергії) чи експозиційної дози іонізуючого випромінювання в сучасній дозиметрії та радіометрії живаються, як правило, три типи детекторів: *сцинтиляційні*, *напівпровідникові* та *газові*. Принципово інші методи реєстрації іонізуючих променів — *хімічний* (в т. ч. фотографічний), *термолюмінесцентний* (ТСЛ-дозиметрія), *калориметричний* (в болометрах) — застосовуються для визначення дози іонізуючого потоку випромінювання (поглинутої чи еквівалентної) і використовують ефект тривалого накопичення дії радіації.

Основний фізичний принцип роботи трьох перших типів детекторів — утворення численних вільних носіїв заряду в невеликій локальній області при поглинанні кванта радіації. Далі реє-

струється або кількісний результат руху цих згенерованих носіїв в прикладеному електричному полі (газорозрядні та напівпровідникові детектори), або їх рекомбінація (сцинтиляційні детектори). Представимо відомі фізичні механізми, якими можна скористатися для реєстрації іонізуючого випромінювання, за такою схемою:

$$h\nu \rightarrow \begin{cases} X - \text{поглинання} \\ \gamma - \text{комттон} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} e^- - h\nu \left(N_0 = \frac{h\nu}{3E_s} \right) \rightarrow \begin{cases} e^- \text{ в } \bar{E}_0 \rightarrow \text{напівпровідникові} \\ \text{рекомбінація} \rightarrow \text{сцинтилятори} \\ \text{локалізація} \rightarrow \text{ТСЛ} \end{cases} \\ \text{фониони} \left(\frac{2}{3} h\nu \right) \rightarrow \begin{cases} \text{тепло} \rightarrow \text{болометри} \\ \text{акуст.} \rightarrow \text{акустичні} \end{cases} \end{cases}$$

Основний недолік сцинтиляційних детекторів полягає в наявності двох етапів трансформації енергії гамма-кванта, а саме рекомбінація електронних збуджень в діелектричному сцинтиляційному кристалі породжує оптичну сцинтиляцію, яка в подальшому за допомогою фотоелектронного помножувача (ФЕП) або фотодіода (ФД) перетворюється в електричний імпульс [1].

Також слід зазначити, що ФЕП і ФД втрачають здатність працювати в режимі підвище-

них температур навколишнього середовища, оскільки при цьому значно зростає темновий струм фотоперетворювачів, а разом з ним рівень шумів, на фоні яких необхідно реєструвати сцинтиляційний імпульс. До того ж у цьому випадку значну негативну роль відіграватиме ефект температурного «згасання» люмінесценції, що вкупі з попереднім накладає серйозні обмеження на використання сцинтиляційних детекторів при температурах, вищих за кімнатну. При застосуванні діелектриків ($E_g \geq 5$ eВ) як сцинтиляційних матеріалів, з одного боку збільшується ймовірність рекомбінацій електронно-діркових пар на центрах рекомбінації (за рахунок низької рухливості вільних носіїв заряду), але, з іншого боку, значно зменшується кількість згенерованих електронно-діркових пар, викликаних поглинанням гамма-кванта. Правда, трапляються окремі діелектричні матеріали, для яких характерною особливістю є висока ефективність поглинання іонізуючого випромінювання.

Важливою перевагою напівпровідникових детекторів є пряма трансформація енергії гамма-кванта в електричний імпульс і, відповідно, вища спектральна роздільна здатність та точність визначення енергії квантів радіоактивного випромінювання. Найбільш широко використовуються високої якості кремнієві $p-i-n$ -детектори, але вони мають низьку ефективність поглинання рентгенівського і гамма-випромінювання, до того ж існує обмеження по глибині $p-n$ -переходу детектора. Для кристалів CdTe і ZnCdTe поглинання потоку радіації є значно кращим, але невисока степінь структурної досконалості цих матеріалів (наявність різноманітних дефектів структури) створює інші проблеми. Основний недолік цих детекторів полягає в малій ширині забороненої зони і, відповідно, значній власній провідності цих матеріалів при кімнатній температурі, що й зумовлює високий рівень шуму в детекторах. В умовах підвищених температур навколишнього робочого середовища для детекторів спектрометра використовується обов'язкове примусове охолодження.

Напівпровідникові і сцинтиляційні детектори не можуть використовуватися при високих температурах, тому як аварійні детектори в контурах охолодження АЕС та в товщиномірах гарячого прокату металургійних заводів до цих пір вимушено застосовуються газові детектори, незважаючи на їхню низьку чутливість.

2. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДЕТЕКТОРІВ

З метою виявлення напівпровідникових матеріалів, які б мінімізували зазначені недоліки, був проведений порівняльний аналіз детекторів за такими критеріями:

- ✦ ефективність поглинання іонізуючого випромінювання;
- ✦ ефективність генерації електронно-діркових пар при поглинанні кванта радіації;
- ✦ рухливість вільних електронів і дірок в прикладеному електричному полі;
- ✦ температурні залежності темної та рентгенопровідності;
- ✦ однорідність кристалічної структури та технологічна можливість вирощування якісних монокристалів великого об'єму;
- ✦ радіаційна стійкість матеріалу;
- ✦ електричні шуми напівпровідникового детектора.

Також розглядалася можливість застосування двох методів реєстрації: *інтегрального* та *імпульсного*. У результаті отримано висновок: при температурах, вищих за кімнатну, як матеріал для напівпровідникового детектора необхідно використовувати широкозонні напівпровідники ($E_g > 2,5$ eВ) дуже високої чистоти, з низькою концентрацією власних структурних дефектів.

За нашими оцінками, на сьогоднішній день найбільш структурно досконалими серед широкозонних напівпровідників є монокристали селеніду цинку (ZnSe). Але за цими параметрами сучасні монокристали ZnSe поступаються монокристалам Si, оскільки для отримання надзвичайно якісного кремнію було витрачено багато часу, зусиль та коштів. Проте якщо

якість монокристалів ZnSe стане наближеною до якості кремнію, то основні технічні характеристики аналізаторів спектрів іонізуючого випромінювання на ZnSe-детекторах стануть кращими, ніж на Si-детекторах. Підставою для такого твердження є хоча б те, що навіть при температурі 150 °С темновий струм високоомного ZnSe-детектора не перевищує цього ж параметра в однаковому за геометрією кремнієвому $p-i-n$ -фотодіоді, але при температурі 25 °С.

Чудові діелектричні властивості високоомних кристалів ZnSe дають можливість створювати в напівпровідникових детекторах електричні поля з напруженостями до 9000 В/см [2, 3], що забезпечує досить високу дрейфову швидкість і, відповідно, ефективний збір носіїв заряду на електродах детекторів. При цьому порівняно зі сцинтиляторами відсутнє зменшення сигналу за рахунок коефіцієнта перетворення та втрат світлового потоку при з'єднанні кристалів сцинтиляторів з фотоприймачами.

3. ПРИНЦИПОВІ ПЕРЕВАГИ ZnSe-ДЕТЕКТОРІВ

1. Велика ширина забороненої зони ($E_g = 2,68$ еВ при $T = 300$ К). Це означає, що концентрація вільних електронів аж до 450 К залишається меншою за $n < 1$ см⁻³ і тільки при 600 К можна спостерігати власну провідність бездомішкового монокристала ZnSe. Звичайно, таких чистих кристалів поки що не існує, але зараз доступні зразки, в яких концентрація вільних електронів (обумовлена донорним рівнем на глибині ~1 еВ) менша за 1000 носіїв в 1 см³. Такі концентрації вільних носіїв заряду на багато порядків менші, ніж в Si чи CdTe. У цьому випадку темнову провідність в ZnSe навіть складно зареєструвати: на зразок необхідно подавати напругу в кіловольтах, а вимірювати струм в пікоамперах. Такий постійний струм не дає помітного внеску в шуми реєструючої системи. Це дозволяє застосовувати як інтегральний, так і імпульсний методи реєстрації рентгенівського і гамма-випромінювання.

2. Отримані експериментальні криві температурної залежності рентгенопровідності селеніду

цинку свідчать, що чутливість ZnSe помітно не змінюється при температурах від 295 до 450 К [4]. При цьому струм рентгенопровідності залишається більшим за струм темної провідності.

3. Експериментально перевірено, що ВАХ рентгенопровідності селеніду цинку практично лінійні аж до напруженості електричних полів ~5000 В/см [4, 5]. Тому дещо менше значення рухливості вільних електронів та дірок в ZnSe у порівнянні з Si та CdTe можна повністю компенсувати створенням сильного електричного поля. Крім того, кристали ZnSe мають ще цілу низку привабливих властивостей:

- ✦ нині вже доступні досить якісні кристали ZnSe великих розмірів ($\varnothing = 50$ мм, $h = 60$ мм);
- ✦ селенід цинку — хімічно нетоксичний матеріал, і його виробництво екологічне на всіх етапах;
- ✦ матеріал має найвищий показник радіаційної стійкості (рівний 10⁸ рад) серед відомих сцинтиляторів;
- ✦ кристал легко механічно обробляється і полірується;
- ✦ є розроблена технологія нанесення омичних електричних контактів.

Викладені вище результати досліджень для кристалів ZnSe доводять, що можна створювати на їх основі напівпровідникові детектори для реєстрації низькоенергетичного рентгенівського і гамма-випромінювання. При цьому залежно від завдання для реєстрації іонізуючого випромінювання можна застосовувати як інтегральний, так і імпульсний методи. При інтегральній реєстрації сучасна мікроелектронна база дозволяє гарантовано вимірювати постійний струм з мінімальною чутливістю на рівні 0,1 пА. Для імпульсної реєстрації використовуються зарядочутливі підсилювачі, такі, як розроблений авторами ZA234 та промисловий CPS10 з чутливістю від декількох сотень електронів (~1400 мВ/рКл).

4. РОЗМІРИ ДЕТЕКТОРІВ І ГЕОМЕТРІЯ КОНТАКТІВ

За умови достатніх розмірів монокристалів ZnSe можна виготовити цілу низку різноманіт-



Рис. 1. Зразок монокристала ZnSe для вимірювання гамма-випромінювання

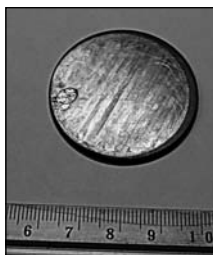


Рис. 2. Зразок монокристала ZnSe для м'якого рентгенівського випромінювання

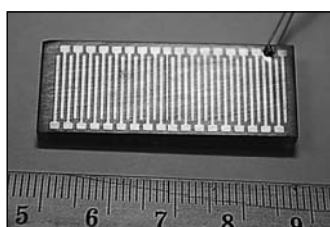


Рис. 3. Зразок монокристала ZnSe для вимірювання рентгенівського (м'якого та жорсткого) і гамма-випромінювання

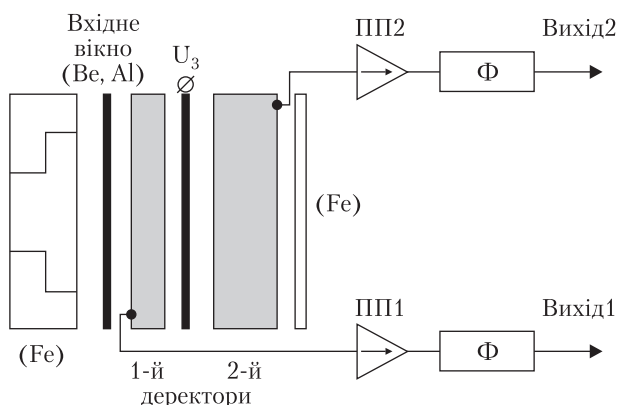


Рис. 4. Схематичне зображення конструкції двокристалного детектора

них за формою детекторів з різною конфігурацією електричних контактів. Вимірювання проводилися на таких зразках:

1) для потужного гамма-випромінювання (Cs^{137} , Co^{60}) з енергіями $h\nu_x > 0,3$ МеВ: форма – паралелепіпед, розміри – $10 \times 15 \times 40$ мм³, об'єм $V = 6$ см³ (рис. 1);

2) для рентгенівського випромінювання: а) в діапазоні енергій $2 \text{ кеВ} < h\nu_x < 80 \text{ кеВ}$, форма – диск $\text{Ø} = 40$ мм, товщина $d = 2$ мм; б) при енер-

гіях $h\nu_x > 80$ кеВ диск $\text{Ø} = 40$ мм, товщиною $d = 3,5$ мм, площею $S = 10,7$ см²; в) для «м'якого» рентгенівського випромінювання з енергіями $h\nu_x < 40$ кеВ, форма – диск $\text{Ø} = 40$ мм, товщина $d \leq 2$ мм, з електричними контактами лише на одній поверхні кристала для зниження ємності детектора, зображений на рис. 2; г) лінійка для рентгенівського і гамма-випромінювання розмірами $2 \times 16 \times 40$ мм³ з періодом контактів 1 мм, зображення на рис. 3. Крім того, таку лінійку можна також застосовувати для реєстрації «м'якого» рентгенівського випромінювання, об'єднавши між собою верхні і нижні контакти.

5. КОНСТРУКЦІЯ ДЕТЕКТОРА

Існують 2 варіанти конструкції детектора: *однокристалний детектор* (традиційний); *двокристалний детектор* (зображений схематично на рис. 4, де 1-й детектор використовується для реєстрації рентгенівського випромінювання і є фільтром для 2-го детектора, який використовується для реєстрації гамма-випромінювання. Однокристалний детектор має два електричні контакти – один для подачі напруги U_0 , а другий під'єднується до входу підсилювача (ППС – підсилювач постійного струму або ЗЧП – зарядочутливий підсилювач). Двокристалний детектор дозволяє одночасно вимірювати інтенсивності як рентгенівського, так і гамма-випромінювання.

Слід зазначити, що кристали ZnSe надзвичайно чутливі до УФ-випромінювання і тому для реєстрації рентгенівського випромінювання необхідно застосовувати вхідне захисне вікно, яке зображено на рис. 5. Для випадку реєстрації інтенсивного поліхроматичного іонізуючого випромінювання розроблено лабораторний двоканальний ППС з чутливістю 0,1 пА, який дозволяє вимірювати струм від кожного детектора та їх різницю (тобто складові інтенсивності рентгенівського і гамма-випромінювання окремо). Ця ж система дозволяє вимірювати інтенсивність чисто рентгенівського випромінювання більш точно, якщо викорис-



Рис. 5. Зовнішній вигляд вхідного блока детектора іонізуючого випромінювання із вхідним захисним вікном

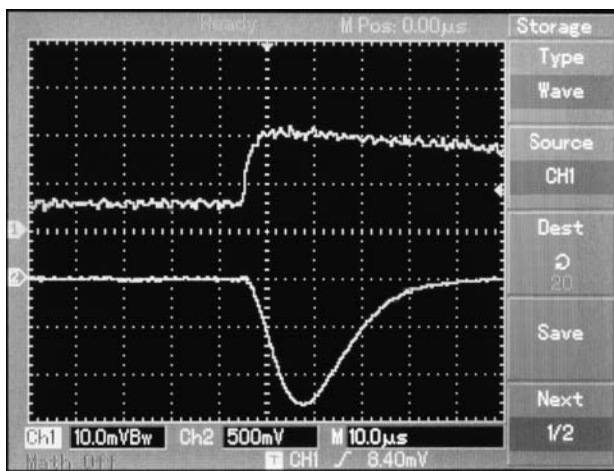


Рис. 6. Осцилограми сигналів на виходах ЗЧП типу ZA234 від джерела радіонукліда Ra-226

товувати другий детектор для компенсації темнового струму першого детектора. Для імпульсної реєстрації використовувалися розроблені авторами зарядочутливий підсилювач ZA234 та формувач імпульсів AFS2d. Особливістю ZA234 є технічна можливість компенсації залежності коефіцієнта передачі ЗЧП від ємності детектора, що значно покращує спектрометричні показники вимірювальної апаратури. Пристрій ZA234 забезпечує дуже високу швидкодію: час наростання сигналу на виході ЗЧП не більше 1 нс при ємності детектора 50 пФ і не більше 10 нс при ємності 500 пФ.

При використанні радіонукліда Ra-226 як джерела іонізуючого випромінювання на ви-

ходах обох детекторів спостерігаються чіткі «гаусові» імпульси після проходження формувача сигналу AFS2d (нижня крива на рис. 6). При цьому зазначимо, що рівень шуму в ZnSe-детекторах надзвичайно низький: при зміні напруги на детекторі (U_0) від 0 до 600 В рівень шуму практично залишається постійним (<1 мВ).

6. ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ПОРТАТИВНОГО ДОЗИМЕТРА

Можна запропонувати декілька варіантів конструкції портативного дозиметра в залежності від його призначення. Наприклад, для ефективної реєстрації в умовах полігону надзвичайно небезпечного радіонукліда Am-241 найбільш доцільною буде конструкція двокристалльного детектора з імпульсною системою реєстрації. За попередніми оцінками розміри такого портативного детектора з робочою поверхнею $\sim 10 \text{ см}^2$ не будуть перевищувати $80 \times 80 \times 170 \text{ мм}^3$, а вага досягне 800 г.

Робота виконана в рамках науково-технічного проекту «Розроблення лабораторного та портативного зразків детектора для реєстрації низькоенергетичного рентгенівського та гамма-випромінювання» (Програма наукового приладобудування НАН України на 2013 рік).

ЛІТЕРАТУРА

1. Атрощенко Л.В., Бурачас С.Ф., Гальчинецький Л.П. и др. Кристаллы сцинтиляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе / К.: Наук. думка, 1998. — 254 с.
2. E.E. Eissler, K.G. Lynn. Properties of melt-grown ZnSe solid-state radiation detectors // Nuclear Science. — 1995. — V. 42. — P. 663–667.
3. Sofiienko A.O., Degoda V.Ya. X-ray induced conductivity of ZnSe sensors at high temperatures // Radiation Measurements. — 2012. — V. 47, № 1. — P. 27–29.
4. Бродин М.С., Дегода В.Я., Кожушко Б.В., Софієнко А.О. Високотемпературна рентгенопровідність особливо чистих кристалів селеніду цинку // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2011. — Т. 2 (8), № 4. — С. 25–30.
5. Дегода В.Я., Софієнко А.А. Особенности люминесценции и электропроводности селенида цинка при рентгеновском и фотовозбуждении // ФТП. — 2010. — Т. 44, № 5. — С. 594–599.

*М.С. Бродин, В.Т. Весна,
В.Я. Дегода, И.Л. Зайцевский, Б.В. Кожушко*

ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР
РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведен краткий анализ главных типов детекторов ионизирующего излучения, их преимуществ и недостатков. Обосновано применение полупроводникового детектора на базе ZnSe при повышенных температурах. Используются разные формы образцов детекторов, изготовленных из селенида цинка, и двокристалльная схема для регистрации рентгеновского или гамма-излучения в широком энергетическом диапазоне. С помощью изготовленного макета прибора продемонстрирована возможность регистрации гамма-квантов высокоомным детектором из ZnSe в режиме отдельных импульсов.

Ключевые слова: рентгеновское и гамма-излучение, полупроводниковый детектор, монокристалл селенида цинка, зарядочувствительный усилитель.

*M.S. Brodyn, V.T. Vesna,
V.Ya. Degoda, I.L. Zaitsevskiy, B.V. Kozhushko*

DUAL-ENERGY SEMICONDUCTOR
DETECTOR OF X-RAYS
AND GAMMA RADIATION

Analysis of the major types of ionizing radiation detectors, their advantages and disadvantages are presented. Application of ZnSe-based semiconductor detector in high temperature environment is substantiated. Different forms of ZnSe-based detector samples and double-crystal scheme for registration of X- and gamma rays in a broad energy range were used. Based on the manufactured simulator device, the study sustains the feasibility of the gamma quanta recording by a high-resistance ZnSe-based detector operating in a per-pulse mode.

Key words: X-radiation, gamma radiation, semiconductor detector, ZnSe single crystal, charge sensitive amplifier.

Стаття надійшла до редакції 16.12.13