

УДК 621.382: 621.383.8

В.Л. Перевертайло, канд. фіз.-мат. наук, А.В. Приходько, Л.І. Тарасенко, А.В. Перевертайло, Е.А. Шкіренко

Радіаційні характеристики напівпровідникових детекторів α -, β -, γ -випромінювання на основі р-і-n структур і застосування в дозиметричних і радіометричних приладах

Проведены исследования радиационных характеристик детекторов α -, β -, γ -излучения на основе кремниевых р-і-n диодов. Показано, что α -детекторы имеют эффективность регистрации α -частиц почти 100 % и высокую линейность счетной характеристики в широком диапазоне интенсивности α -излучения. β -детекторы имеют меньшую эффективность регистрации (до 40 % при толщине детектора около 400 мкм) и высокую линейность от минимальных потоков до 10^5 частиц/см²мин. Определено, что для детектора сцинтиллятор-фотодиод со сцинтиллятором CsJ(Tl) и кремниевым р-і-n фотодиодом область линейности счетной характеристики наблюдается только для интенсивности γ -излучения до 500 мкЗв/час, а при превышении этой мощности счетная характеристика становится нелинейной.

The researches of α -, β -, γ -detectors, based on Si р-і-n-diodes, are carried out. It has been shown that α -detector registering efficiency was almost 100%, and counting characteristics have high linearity in a wide range of α -intensity. β -detectors have lower registration efficiency (up to 40 % at the thickness of the detector about 400 microns), and high counting linearity in the range from the minimum flow up to 10^5 particles/cm²·min. It has been defined that for the scintillator-photodiode detector with the scintillator CsJ(Tl) and silicon р-і-n photodiode the linearity domain of the counting characteristic is observed only for the γ -intensity up to 500 μ Zv/hour but at higher levels of intensity the counting characteristic becomes nonlinear.

Вступ

Напівпровідникові детектори є перспективними для реєстрації різноманітних видів випромінювань та часток [1]. При їх застосуванні в дозиметричній та радіометричній апаратурі важливу роль відіграють радіаційні характеристики, а саме – рахункові характеристики і їх залежності від інтенсивності та енергії часток і випромінювань. Ці характеристики визначають діапазон вимірювання потужності випромінювань або щільності потоків, точність вимірювання цих величин та інші параметри. В свою чергу радіаційні характеристики залежать від конструктивно-технологічних параметрів та властивостей напівпровідникового матеріалу детекторів. Найбільш привабливим матеріалом є кремній завдяки розвинутій кремнієвій технології і можливості створювати не тільки дозиметричні і радіометричні але й спектрометричні детектори. Завдяки освоєнню технології виготовлення кремнієвих р-і-n структур на лінійках виробництва інтегральних схем (ІС) [2] з'являється можливість серійного виробництва сенсорів випромінювань та їх впровадження у приладах для охорони

праці, екології (дозиметрія, радіометрія, прилади контролю концентрації радону, контролю рівня радіаційних забруднень), в атомній енергетиці (прилади контролю стану ядерних реакторів, контролю виробництва ядерного палива), оборонній галузі (прилади радіаційного контролю, виявлення випромінювань та потоків заряджених і нейтральних ядерних часток, гамма-, нейтронних полів [3].

Застосування напівпровідникових детекторів у дозиметричних і радіометричних приладах дозволяє поліпшити параметри приладів [1-4], зменшити габаритні розміри, мінімізувати споживану потужність і збільшити час автономної роботи приладів. Основою таких детекторів є кремнієва р-і-n структура (рис.1), де на поверхні кремнієвої підкладки сформовано р-n-перехід, що є планарним діодом.

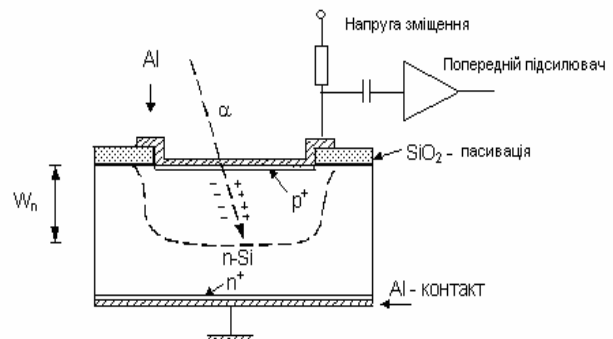


Рис. 1. Схематичне зображення кремнієвої р-і-n структури у вигляді планарного діоду

Для збільшення товщини області просторового заряду (ОПЗ), яка формується при прикладенні зворотної напруги до р-n-переходу і є робочим об'ємом детектора, використовується високоомний матеріал. Електричне поле в ОПЗ розводить в протилежні сторони електронно-діркові пари, генеровані при поглинанні енергії від високоенергетичної частки або гамма-кванту при їх взаємодії з матеріалом кремнієвої підкладки. Електрони збираються електродом підкладки, а дірки збираються верхнім діодним електродом. Цей процес відбувається в масштабі наносекундних відрізків часу так що носії заряду формують сигнал від частки у вигляді короткого зарядового імпульсу, що поступає на вхід зарядочутливого попереднього підсилювача-перетворювача (ПП), який перетворює зарядовий імпульс на імпульс напруги, що несе інформацію про енергетичні та інші параметри поглинутої частки або кванту випромінювання. Для високоомного кремнію ($\rho \geq 3 \cdot 10^3$ Ом·см) при достатньо високих зворотних напругах на р-n-переході (60-80 В) можлива ситуація, коли ОПЗ досягає зворотної сторони пластини, тобто досягається режим повного збіднення і об'єм робочої області стає максимальним. Для товщини детектора 300 мкм величина заряду, гене-

рованого в ньому однією часткою з мінімальною енергією іонізації, становить 23000-25000 електронно-діркових пар. Частки з більшою іонізуючою здатністю, наприклад α -частки, створюють набагато більші заряди. При цьому вважають, що на утворення однієї електронно-діркової пари витрачається енергія біля 3,6 еВ.

1. Конструкція і характеристики детекторів альфа-частинок

Для реєстрації альфа-частинок нами використувався кремнієвий р-і-п діод, виготовлений на високоомному кремнії (1 кОм-см) по технології виготовлення р-і-п структур [1]. Після корпусування кристалу р-і-п діода він може застосовуватися як детектор альфа-частинок і практично не вимагає доробки після його виготовлення по планарній технології. На рис. 2 показано фото зібраного в металевий корпус альфа-детектора з активною площею 5 см². Перевагами кремнієвого детектора є висока ефективність реєстрації альфа-часток у порівнянні з іншими типами детекторів (іонізаційні камери, сцинтиляційні детектори) завдяки прямому перетворенню енергії частки в заряд, що властиво для напівпровідникових детекторів (НПД).

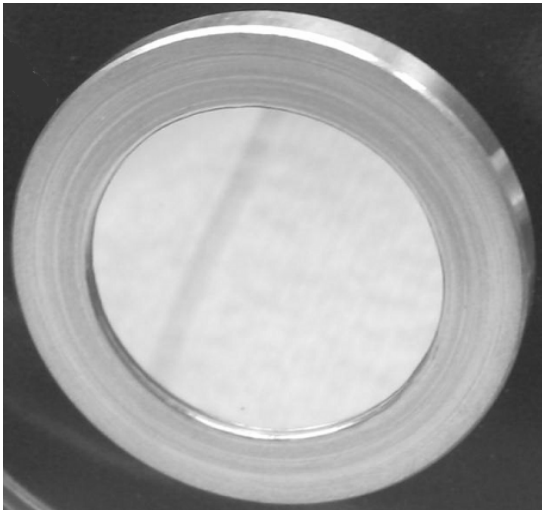


Рис. 2. Фото альфа-детектора на основі р-і-п діода, зібраного в металевому корпусі. Активна площа – 5 см² у вигляді круга діаметром 25 мм

Перевагами НПД також є можливість створення тонкого вхідного вікна (товщиною в декілька мікрон), що забезпечує мінімальне поглинання енергії в пасивній поверхневій оболонці детектора. Пасивація периферії р-п переходу за допомогою термічного SiO₂ забезпечує низькі значення темного струму детектора (1-2 нА/см²) в широкому діапазоні зворотних напруг (0-100 В) і стабільність його електричних характеристик. Для часткового зменшення впливу електромагнітних коливань вхідне вікно альфа-детектора покривається шаром алюмінію товщиною 1 мкм. Для альфа-частинок з енергією 5 МеВ глибина поглинання в кремнії становить біля 100 мкм, тому стандартна товщина кремнієвої пластини (400-460 мкм) не лімітує ефективність реєстрації. Рахункова характеристика альфа-детектора з активною площею 1 см² показана

на рис. 3 для джерела з рівномірно розподіленою по площі альфа-активністю.

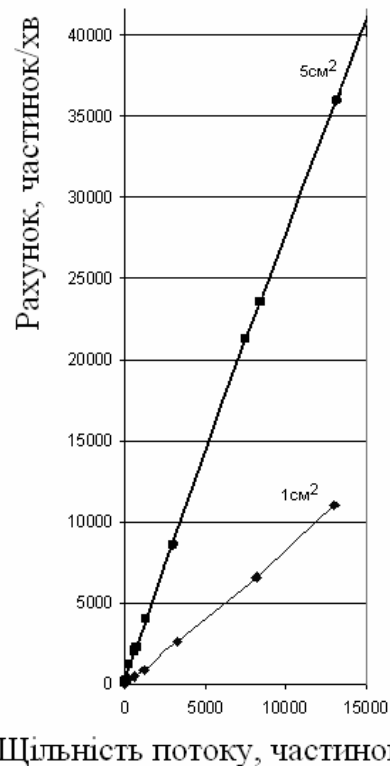


Рис. 3. Результати вимірювання щільності потоку α - випромінювання на джерелі іонізуючого випромінювання ²³⁹Pu (кількості зареєстрованих блоком детектування α - частинки за хвилину) для різної інтенсивності α - випромінювання

З малюнка 3 видно, що ефективність реєстрації α - частинок детектором практично близька до 100% та зберігає лінійну залежність у широкому діапазоні інтенсивності α - випромінювання.

2. Обмеження і характеристики детекторів бета-частинок

Мінімальна енергія β -випромінювання, яка може бути зареєстрована детектором, залежить від рівня шумів вхідного каскаду ПП та шумів детектора, які визначаються такими параметрами як величина ємності і величина темного струму детектора. Для рівня технології, що забезпечує темнові струми 1-2 нА/см² на високоомному кремнії зонної плавки з питомим опором 3-5 кОм-см, що відповідає ємності біля 50 пФ/см² (при зворотній напрузі на р-п переході 50 В), нами одержані дані за допомогою спектрометричної установки про можливість реєстрації β -часток з енергією 10-50 кеВ при кімнатній температурі, що є рівнем найкращих сучасних детекторів [5]. Щодо можливості реєстрації високоенергетичних частинок, то тут для кремнієвого β -детектора виготовленого по планарній технології на стандартних пластинах кремнію товщиною біля 400 мкм товщина самого детектора лімітує ефективність реєстрації високоенергетичного β -випромінювання через малу долю енергії, що поглинається в тонкому детекторі.

Нами проведені дослідження радіаційних характеристик β -детекторів на основі кремнієвого детектора Д1001 (рис.4) з іонно-імплантованим р-n-переходом, що має наведені вище електрофізичні параметри.

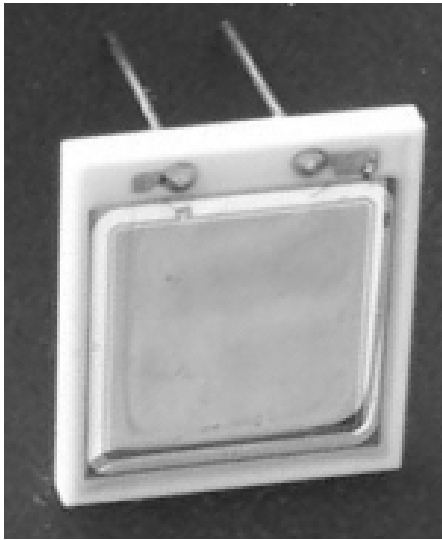


Рис. 4. Фото бета-детектора на основі р-і-n діода Д1001, зібраного на керамічній основі. Активна площа—квадрат 1 см^2

Детектор, що має площу 1 см^2 та товщину близько 375 мкм опромінювався джерелом β -випромінювання $\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$ з максимальною енергією до 2 MeV . Типова рахункова характеристика детектора показана на рис. 5, щільність потоку β -випромінювання змінювалася у діапазоні від 10 частинок/ $\text{см}^2 \cdot \text{хв}$ до 10^5 частинок/ $\text{см}^2 \cdot \text{хв}$.

Кремнієвий детектор Д1001 показує високу лінійність в широкому діапазоні для різної інтенсивності

β -випромінювання, від одиниць до 10^5 часток/ $\text{см}^2 \cdot \text{хв}$. Ефективність реєстрації β -часток біля 40% для даної товщини детектора.

3. Детектор сцинтилятор-фотодіод та нелінійність його характеристик при реєстрації гамма-випромінювання.

Для реєстрації гамма-випромінювання використовувалися блоки детектування (БД) на основі пари сцинтилятор (СЦ) - фотодіод (ФД), у якій фотодіод замінює традиційний фотопомножувач. Виготовлення γ -детекторів на основі пари (СЦ-ФД) здійснюється шляхом з'єднання фотодіода з кристалом сцинтилятора з забезпеченням якісного оптичного зв'язку між ними. В γ -детекторі можуть використовуватись такі сцинтиляційні матеріали як CsJ(Tl) [6], ZnSe(Te) , CdWO_4 , NaJ(Tl) та інші [7].

У якості СЦ був вибраний кристал CsJ(Tl) розміром 1 см^3 , а в якості ФД використаний кремнієвий р-і-n фотодіод ФД0501 з активною площею 25 мм^2 . Другий варіант детектора - CsJ(Tl) розміром 125 мм^3 і кремнієвий р-і-n фотодіод ФД0501 з активною площею 25 мм^2 . Третій варіант детектора - CsJ(Tl) розміром 27 мм^3 і кремнієвий р-і-n фотодіод ФД0501 з активною площею 25 мм^2 . Детектори запаковувалися у світловідбиваючу оболонку та в металевий екран.

Нелінійність залежності кількості зареєстрованих γ -квантів від потужності джерела випромінювання зумовлена особливостями поведінки сцинтилятора CsJ(Tl) , який стає інерційним при високій інтенсивності падаючих γ -квантів, що підтверджується лінійністю залежності при малій інтенсивності γ -випромінювання, як це видно з рис. 8.

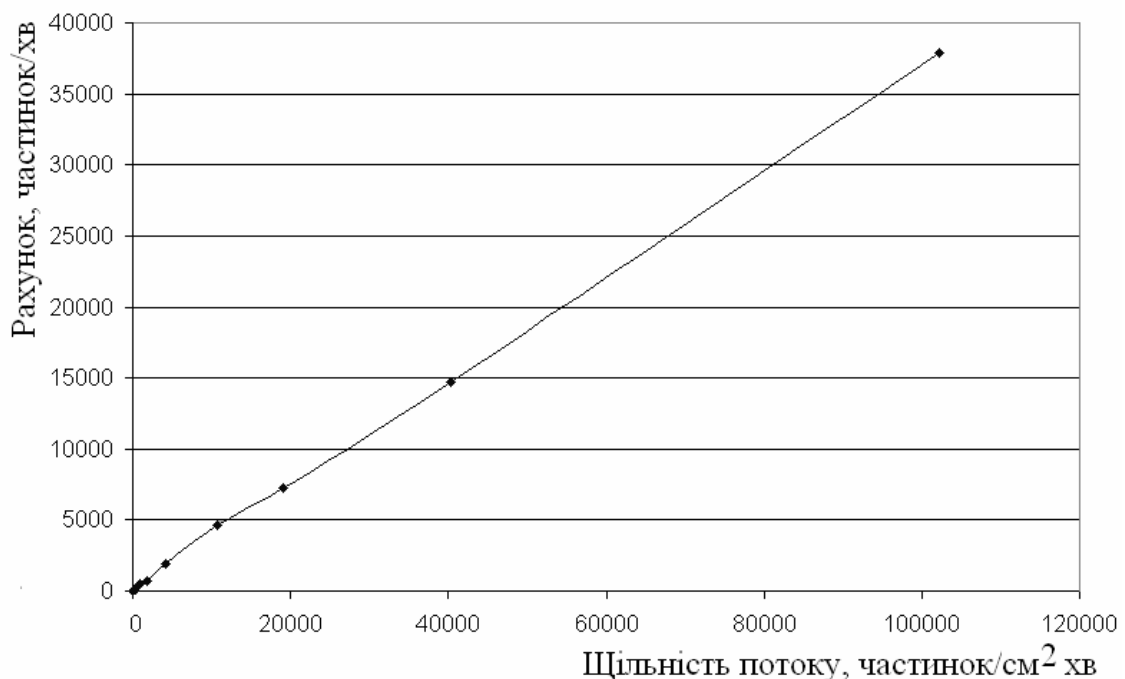


Рис. 5. Результати вимірювання щільності потоку β -випромінювання детектором Д1001 на джерелі іонізуючого випромінювання $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ для різної інтенсивності β -випромінювання

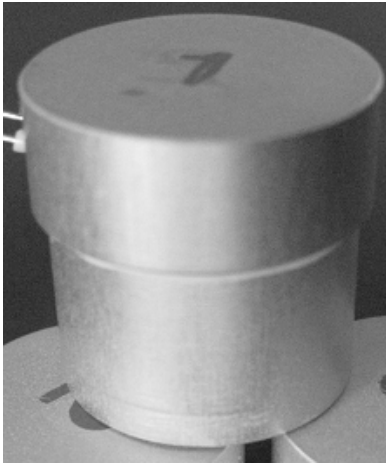


Рис. 6. Фото детектора ФД-СЦ на основі CsJ(Tl) розміром 1 см^3 та р-і-п фотодіода ФД0501 з активною площею 25 мм^2

Наведені характеристики стабільні в часі, що дозволяє врахувати їх нелінійність, та виправити її програмними засобами. Точність вимірювання інтенсивності γ -випромінювання після коригування характеристик може досягати 10%.

Висновки

Проведені дослідження детекторів іонізуючого випромінювання на основі кремнієвих р-і-п структур:

1. Детектори α -часток з активною площею 5 см^2 та 1 см^2 показали ефективність реєстрації α -часток майже 100% та лінійну залежність від інтенсивності потоку α -часток в діапазоні потоків від $1 \cdot 10^1$ до $5 \cdot 10^4$ часток/ $\text{см}^2 \cdot \text{хв}$;

2. Детектори β -часток з активною площею 1 см^2 показали ефективність реєстрації β -часток біля 40% та лінійну залежність від інтенсивності потоку β -часток в діапазоні потоків від $1 \cdot 10^1$ до $1 \cdot 10^5$ часток/ $\text{см}^2 \cdot \text{хв}$.

3. Детектори γ -випромінювання сцинтилятор-фотодіод (СЦ-ФД) на CsJ(Tl) та кремнієвих р-і-п фотодіодах мають лінійну залежність кількості зареєстрованих γ -квантів від інтенсивності γ -випромінювання в діапазоні $0,25$ - 500 мкЗв/год . При інтенсивності, що перевищує 500 мкЗв/год спостерігається нелінійність залежності, яка очевидно зумовлена інерційністю сцинтилятора та процесами накопичення в сцинтиляторі збуджених станів з подовженими часовими інтервалами люмінісценції.

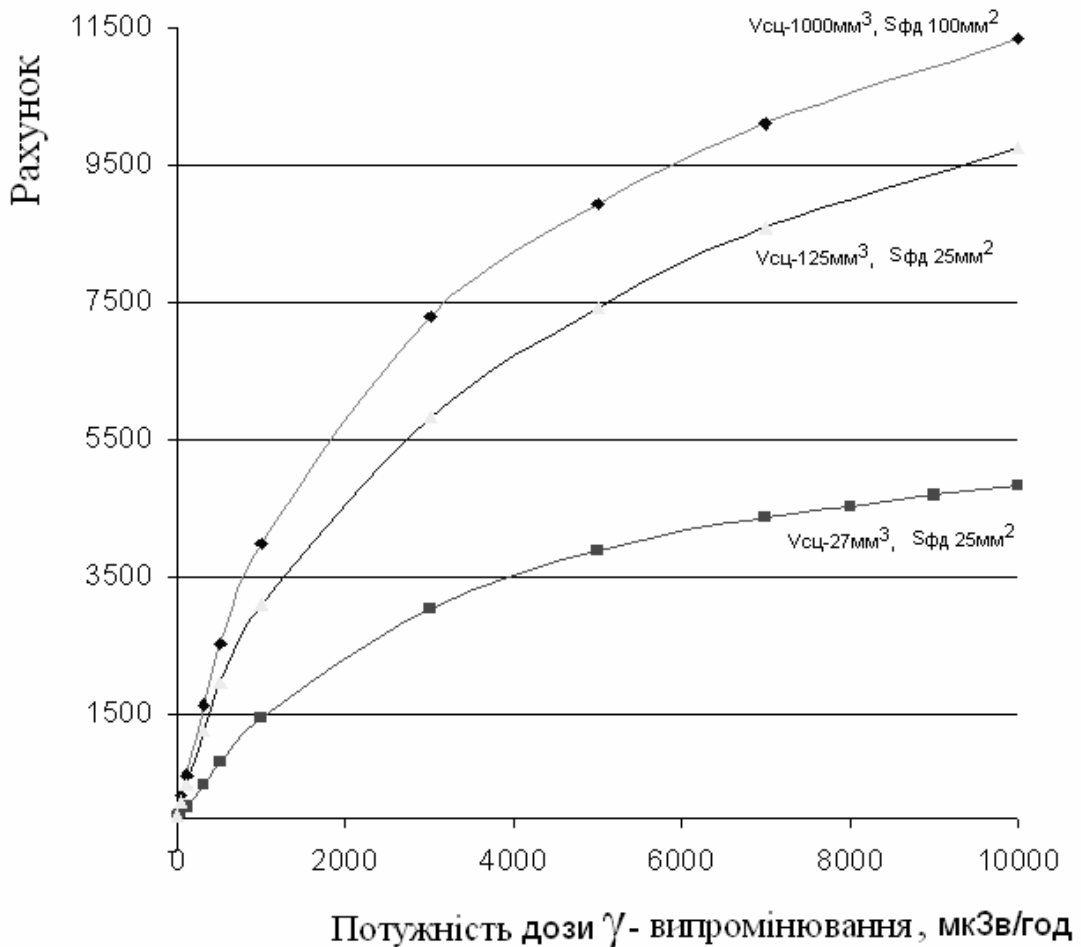


Рис. 7. Результати вимірювання потужності дози γ -випромінювання детектором ФД-СЦ на основі CsJ(Tl) та р-і-п фотодіода на джерелі Cs-137 для різних типів детекторів

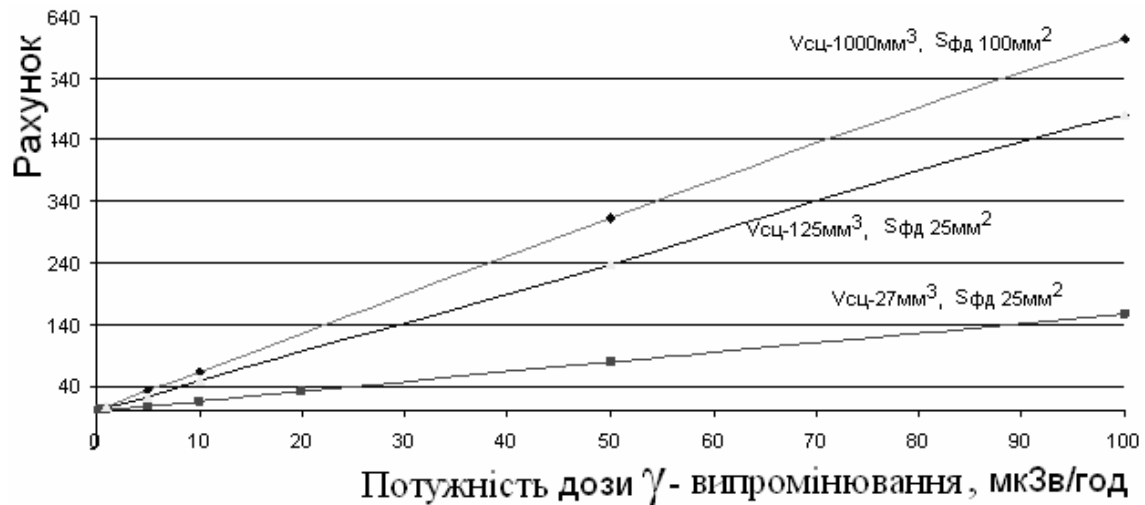


Рис. 8. Результати вимірювання потужності дози γ -випромінювання детектором ФД-СЦ на основі CsJ(Tl) та p-i-n фотодіоду на джерелі Cs-137 для різних типів детекторів при малій інтенсивності випромінювання

Література

1. Lutz G. Semiconductor radiation detectors. – Springer, 1999. – 350p.
2. Перевертайло В.Л. Характеристики і технологія виготовлення кремнієвих планарних p-i-n фотодіодів для сцинтиелектронних детекторів. «Електроника і зв'язь», Тематический выпуск «Проблеми електроніки», Часть 1, 2007, с.15-23.
3. Перевертайло В.Л. Создание элементной базы для ядерно-физического и радиационного приборостроения на основе кремниевой интегральной технологии // Труды Пятой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии», Одесса, 17-21 мая 2004 г., -с.200.
4. H. Spieler. Radiation Detectors and Signal Processing // Okt. 8-12, 2001, Univ. Heidelberg // Introduction: Vertex Detection in High Energy Physics., - p.28-34.
5. <http://www.canberra.com//Products/> PIPS (Charged Particle) Detectors/ Standard PIPS Detectors/ Beta PIPS Detectors: Series B/
6. <http://www.deete.com//> Scintillation Detector Applications using Si Diodes // "Detection Technology Inc."
7. Гринев Б.В., Рыжиков В.Д., Семиноженко В.П. Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе. Под общей редакцией В.Д.Рыжикова, К.: Наукова Думка, 2007. – 311с.