

КРЕМНІСВІ ДЕТЕКТОРИ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПІЇ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ

П.Г. Литовченко, Л.І. Барабаш, В.К. Дубовий, В.Ф. Ластовецький, Т.І. Кібкало,
М.М. Количев, Л.А. Полівцев, В.І. Кочкін, О.П. Литовченко, С.П. Батюта,
В.І. Варніна, О.І. Фіщук

Проведено розробку неохолоджуваних напівпровідникових детекторів гамма-випромінювання на основі кремнію, компенсованого літєм. Випробування детекторів на гамма-джерелах ^{137}Cs та ^{60}Co показали, що ефективність реєстрації складає 2 – 3 %, а чутливість $\sim 0,03$ імп/с/Бк. Енергетична роздільна здатність детекторів гамма-випромінювання складає 25 – 31 кеВ.

Для багатьох практичних завдань необхідно мати портативний прилад з енергетичною роздільною здатністю, кращою ніж у сцинтиляційного БД, з достатньою ефективністю реєстрації гамма-випромінювання, який не потребує охолодження.

Для того щоб поєднати переваги сцинтиляційних детекторів, які працюють при кімнатній температурі і мають велику ефективність реєстрації, з високою енергетичною роздільною здатністю германій-літєвих детекторів, які потребують охолодження рідким азотом, було виконано розробку дослідних зразків неохолоджуваних блоків детектування (БД) гамма-випромінювання на базі кремній-літєвих детекторів з великим об'ємом чутливої області.

При виготовленні кремній-літєвих детекторів треба було провести дослідження та вибір безкисневого р-кремнію з великою рухливістю іонів літію, а також дослідження впливу параметрів вихідного кремнію на рухливість іонів літію, впливу основних характеристик процесу дрейфу на електрофізичні параметри кремній-літєвих структур з великою товщиною чутливої області та розробити технологічний регламент виготовлення детекторів і провести виміри їхніх електрофізичних та спектрометричних характеристик.

1. Вплив параметрів вихідного кремнію на рухливість іонів літію

Коефіцієнт дифузії літію в кремнії при 120°C по методу дрейфу іонів літію складає $7,5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Порівняння отриманих рухливостей літію для різних зразків кремнію показує, що при тій самій температурі вони дуже відрізняються одна від одної. При цьому рівень легування вихідного кремнію не дуже позначається на рухливості. Значною мірою на цю величину впливає присутність кисню в кремнії. Незважаючи на те, що в досліджуваних р-і-п структурах не тільки кисень, але й бор, а також і дислокації можуть зв'язувати літій у комплекси $\{[\text{Li}^+\text{B}^-]^0, [\text{Li}^+\text{O}]^+\}$, що в свою чергу перешкоджає його руху в кремнії, головна роль все ж таки зберігається за киснем.

Розглянемо кількісну оцінку впливу кисню на рухливість іонів літію в кремнії.

Метод іонного дрейфу дає можливість виміряти взаємодію між Li^+ і домішками, оцінити константу дисоціації C^k у наведеному нижче рівнянні і визначити концентрацію кисню.

$$D_{\text{эф}} = \left[\frac{n - N_0 - C^k}{2n} + \sqrt{\left(\frac{n - N_0 - C^k}{2n} \right)^2 + \frac{C^k}{n}} \right] D_0, \quad (1)$$

де $n = [\text{Li}^+] + [\text{Li}^+\text{O}^+]$ - концентрація бору; $N_0 = [\text{O}] + [\text{Li}^+\text{O}^+]$ - концентрація кисню;
 $C^k = \frac{[\text{Li}^+][\text{O}]}{[\text{Li}^+\text{O}^+]}$ - константа дисоціації; D_0 - коефіцієнт дифузії іонів літію в безкисневому кремнії.

$$C^k = (0,5 \div 8,5) \cdot 10^{22} \exp\left[(0,42 \pm 0,03) \frac{e}{kT}\right], \quad (2)$$

Знаючи C^k при даній температурі дрейфу та параметр D_0 , по (1), можна підрахувати концентрацію кисню N_0 .

Визначивши концентрацію кисню N_0 за спектром поглинання на інфрачервоному спектрометрі UR-20 в області 9,1 мкм, треба підставити це значення в (1) та знайти D_0 .

Після кількісної оцінки концентрації кисню в різних зразках кремнію визначено, що рухливість літію в кремнії з концентрацією бору 10^{13} см^{-3} та концентрацією кисню $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ приблизно в п'ять разів перевищує рухливість у кремнії з тією ж концентрацією бору, але в п'ять разів більшою концентрацією кисню ($2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$).

Слід зауважити, що бездислокаційні кристали кремнію при вирощуванні зливків з різними швидкостями і температурними градієнтами можуть мати різні типи мікродефектів: *A*, *B*, *D*. Мікродефекти *A*- і *B*-типу звичайно виявляються в зливках, вирощених при малих і середніх швидкостях вирощування, оскільки при цих умовах є надлишок міжвузлових атомів кремнію, які формують мікродефекти міжвузлового типу. Розмір *A*-дефектів сягає 1 – 10 мкм з концентрацією $10^4 - 10^6 \text{ см}^{-3}$, у них також акумулюються атоми домішок, як в мікропреципітатах.

D-мікродефекти мають вакансійну природу і в них може бути багато вакансійно-кисневих комплексів $n(V.O)$. Їх розмір 40 – 60 Å і концентрація $\sim 10^8 - 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Оскільки вакансії мають від'ємний заряд, а іони літію позитивно заряджені, то *D*-дефекти будуть активними центрами захвату літію і, таким чином, зменшувати рухливість іонів літію, а значить, суттєво зменшувати розміри компенсованого об'єму. Таким чином, *D*-дефекти ведуть себе аналогічно атомам кисню, як центри захвату літію.

Але *D*-центри селективним травленням не виявляються, а лише методами електронної мікроскопії. При визначенні розподілу мікродефектів ми виявили, що *D*-дефекти в основному розміщені по центру зливку, тому в цих місцях можливе зменшення товщини чутливої області. Таким чином, необхідно контролювати вихідний матеріал не лише за розподілом кисню, а й за розподілом мікродефектів.

2. Виготовлення Si(Li) детекторів планарного типу

Для виготовлення *Si(Li)* детекторів планарного типу з великою товщиною чутливої області використовувався кремній р-типу провідності з питомим опором $\rho = 2 - 4 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ і часом життя неосновних носіїв заряду $\tau > 500 \text{ мкс}$, вирощений у вакуумі.

Основними технологічними операціями при виготовленні *Si(Li)* детекторів є дифузія літію і дрейф іонів літію. Для цього зливки ріжуть на зразки заданої товщини, шліфують, обезжирюють. Дифузія проводиться з шару літію, нанесеного на поверхню зразка шляхом наплення літію у вакуумі. Глибина дифузії залежить від температури і тривалості процесу.

Типове значення температури, за якої проводиться дифузія літію, складає 350–400 °С. У результаті дифузії в кристалі утворюється р-п перехід. Після хімічної обробки (обезжирювання, травлення) знімаються вольт-амперні характеристики діодів. Це дозволяє відібрати для проведення дрейфу зразки з $I_{звор} = 1 - 2 \text{ мкА}$ при $V_{звор} = 300 \text{ В}$. Відібрані зразки

розміщують у сушильній шафі, де при температурі 110 – 120 °С у полі зворотного зміщення здійснюється процес дрейфу. Під дією електричного поля іони літію переміщуються в р-область, компенсуючи вихідні акцепторні домішки, що приводить до створення шару з опором, близьким до власного.

Слід зауважити, що струм, який створюється просторовим зарядом при підвищених температурах дрейфу, спотворює електричне поле E , яке створено прикладеною напругою $V_{\text{дрейфу}}$. Якщо знехтувати рекомбінацією і вважати рівними рухливості електронів і дірок $\mu_e = \mu_p$, то носії, створені внаслідок теплової генерації, будуть зумовлювати і діркові, і електронні струми. Градієнт a , обумовлений результируючим просторовим зарядом, який створюється концентраціями дірок і електронів, буде

$$a = \frac{n_i}{\tau_0 \cdot \mu \cdot E} = \frac{W \cdot n_i}{\tau_0 \cdot \mu \cdot V}, \quad (3)$$

де μ - рухливість носіїв, м²/В·с.

Внаслідок спотворення початкового поля іони Li^+ будуть перестроюватись до того часу, як розподіл Li^+ не скомпенсує просторовий заряд рухливих носіїв, які виникають при підвищеній температурі внаслідок генерації.

Після охолодження *p-i-n* структури до кімнатної температури просторовий заряд, створений рухливими носіями, стане зневажливо малим і тому залишиться лише просторовий заряд, обумовлений розподілом Li^+ . Розподіл іонів Li^+ буде відтворювати розподіл просторового заряду рухливих носіїв при підвищених температурах.

Проведені виміри вольт-емнісних характеристик *Si(Li) p-i-n* структур з часом дрейфу іонів Li . Показано, що при збільшенні часу дрейфу насичення ємності проявляється при більш високих значеннях зворотної напруги. Це відповідає збільшенню товщини компенсованої області.

Суттєвим етапом при виготовленні *Si(Li)* детекторів являється так званий вирівнюючий дрейф, який проводиться при температурі дещо меншій, ніж температура дрейфу, що дозволяє отримати більш високу ступінь компенсації акцепторних домішок у вихідному матеріалі *p*-типу провідності. Це призводить до значного зменшення зворотних струмів і шумів детектора. Контроль за глибиною дрейфу здійснюється шляхом зняття *C-V* характеристик.

Детектори виготовлялись по поверхнево-бар'єрній технології. У продрейфованих зразках зшліфовувався некомпенсований *p*-шар. Шліфування пластин закінчувалось порошком М 7; пластини обезжирювались в органічних розчинниках; контакт покривався захисним лаком з боку літію. Підготовлені таким чином зразки травилися в поліруючому травнику. На протравлену поверхню напилялось золото (150 - 200 Å) На рис. 1 представлено переріз детекторної структури. Зразки вмонтовувались у корпус. Знімалися вольт-амперні і вольт-емнісні характеристики готових детекторів, а також енергетичні спектри.

Згідно з розробленим технологічним регламентом було виготовлено дослідні зразки неохолоджуваних БД гамма-випромінювання.

Параметри блоків гамма-детектування

Товщина чутливої області	— 0,45–0,80 см
Площа робочої поверхні	— 4,0–15,0 см ²
Зворотний струм	— ~ 5,0 мкА
Робоча зворотна напруга	— ~ 500 В

Проведено випробовування блоків детектування на джерелах гамма-випромінювання ¹³⁷Cs ($E_{\gamma} = 0,662$ МеВ,) та ⁶⁰Co ($E_{\gamma 1} = 1,17$ МеВ, $E_{\gamma 2} = 1,33$ МеВ).

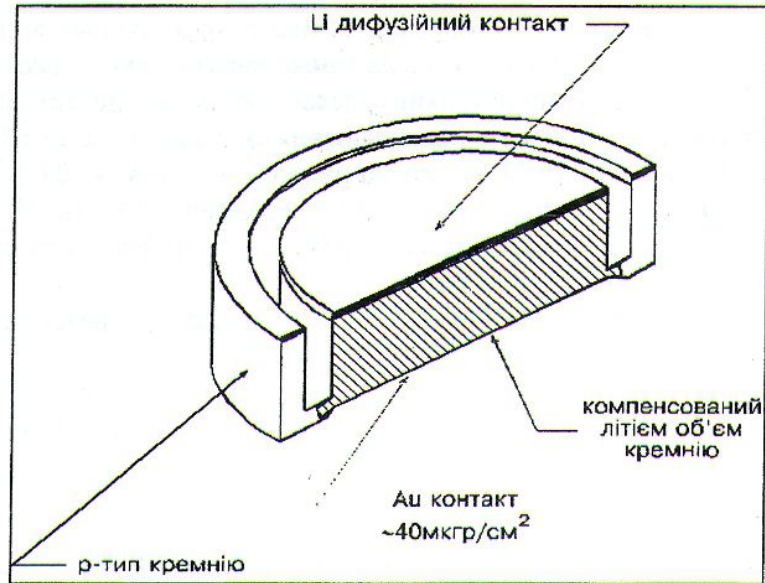
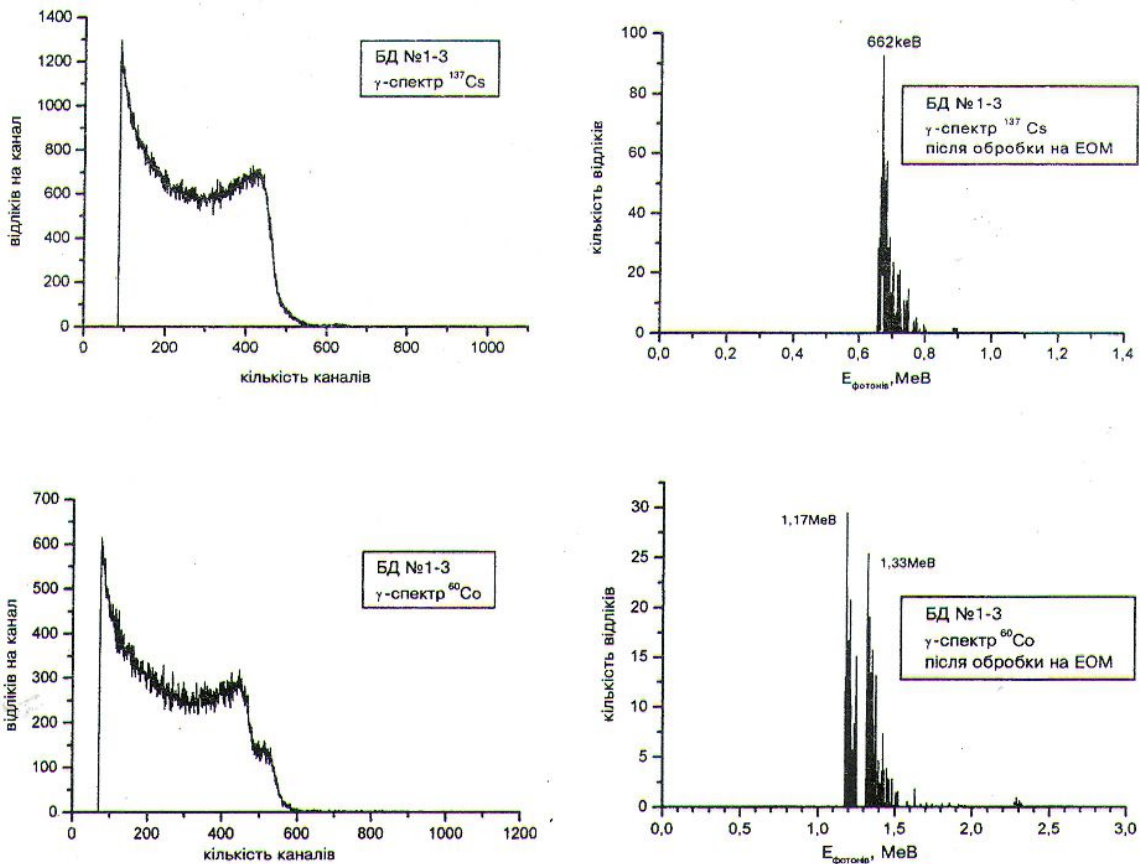


Рис. 1. Схематичне зображення планарної детекторної структури.

Рис. 2. Спектри гамма-випромінювання ^{60}Co та ^{137}Cs , зняті за допомогою неохолоджуваних Si(Li) детекторів.

Ефективність реєстрації гамма-випромінювання розраховується як відношення числа зареєстрованих детектором імпульсів до числа гамма-квантів, які падають на детектор від джерела випромінювання в тілесний кут, який залежить від площі детектора.

Ефективність реєстрації гамма-випромінювання складала від 2 до 3 %.

Чутливість блоків детектування гамма-випромінювання - 0,02 - 0,03 імпл/с/Бк. Енергетична роздільна здатність при опроміненні джерелами ^{60}Co та ^{137}Cs складала 25 - 31 кеВ, що є достатнім для вирішення багатьох задач по ідентифікації та визначенню вмісту гамма-випромінюючих радіонуклідів у пробах.

Спектри гамма-випромінювання, зняті за допомогою розроблених детекторів, представлені на графіках (рис. 2).

Піки гамма-фотонів виділялись із сумарного спектра комптонівських та фотоелектронів шляхом диференціювання комптонівського апаратного спектра з наступним множенням на зворотну функцію чутливості піків.

КРЕМНИЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

П.Г. Литовченко, Л.И. Барабаш, В.К. Дубовой, В.Ф. Ластовецкий, Т.И. Кибкало,
Н.Н. Кольчев, Л.А. Поливцев, В.И. Кочкин, А.П. Литовченко, С.П. Батюта,
В.И. Варнина, О.И. Фищук

Проведена разработка неохлаждаемых полупроводниковых детекторов гамма-излучения на основе кремния, компенсированного литием. Испытания детекторов на гамма-источниках ^{137}Cs та ^{60}Co показали, что эффективность регистрации составляет 2 - 3 %, а чувствительность ~ 0,03 импл/с/Бк. Энергетическое разрешение детекторов гамма-излучения составляет 25 - 31 кеВ.

SEMICONDUCTOR DETECTORS FOR SPECTROSCOPY OF GAMMA-RADIATION

P.G. Litovchenko, L.I. Barabash, V.K. Dubovoy, V.F. Lastovetsky, T.I. Kibkalo,
N.N. Kolychev, L.A. Polivtsev, V.I. Kochkin, A.P. Litovchenko, S.P. Batyuta,
V.I. Varnina, O.I. Fishchuk

The development of noncooling semiconductor detectors of gamma-radiation on the base of silicon compensated by lithium was carried out. The testing of detectors on sources gamma-radiation ^{137}Cs and ^{60}Co indicated that their registration efficiency was 2 - 3 %, sensitivity ~ 0,03 imp/s/Bk. Energy resolution of gamma-detectors was 25-31 keV.