

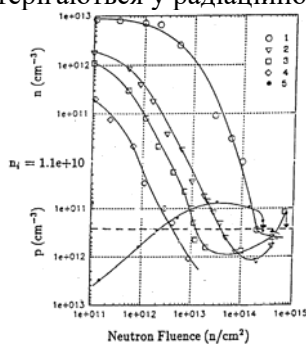
# КРЕМНІЄВІ P-I-N ДІОДИ: ВІД АВАРІЙНИХ ДОЗИМЕТРІВ ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧАЕС ДО ВИКОРИСТАННЯ В ДОВГОТРИВАЛИХ КОСМІЧНИХ МІСІЯХ.

**І. Є. Анохін**

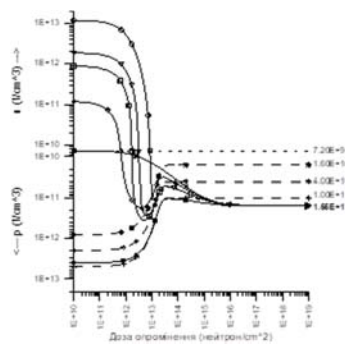
*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Дослідження впливу радіаційного опромінення на електрофізичні властивості кремнію є фундаментальною проблемою фізики напівпровідників та визначальною основою створення сучасних радіаційно-стійких сенсорних систем. Особливої актуальності ці задачі набули після аварії на Чорнобильській АЕС, із новими експериментами на адронному колайдері в CERN, розвитку нових методів в медичній радіаційній фізиці, а також у контексті довготривалих космічних місій, де вплив радіації є критичним фактором.

У роботах автора сформовано узагальнену фізичну концепцію, що описує зв'язок між радіаційними дефектами та змінами електрофізичних характеристик кремнієвих p-i-n структур. Запропоновано модель стабілізації рівня Фермі у високоомному кремнії при наявності багатозарядних амфотерних центрів та встановлено умови інверсії типу провідності при великих дозах опромінення [1]. Ці результати дозволили пояснити низку експериментальних ефектів, які спостерігаються у радіаційно-пошкодженому кремнії.



а) експеримент



б) теорія

Рис. 1. Залежність концентрації вільних носіїв заряду в високоомному детекторному кремнії при опроміненні його швидкими нейтронами від дози опромінення при різних початкових значеннях концентрації мілких домішок.

Ключовим результатом є встановлення механізму зсуву вольт-амперних характеристик p-i-n діодів під дією нейтронного опромінення (Рис. 1-2). Показано, що при високих дозах визначальну роль відіграє не лише деградація часу життя носіїв заряду, але й зміна питомого опору кремнію. Це дозволило суттєво розширити динамічний діапазон вимірювання та створити високочутливі аварійні дозиметри, які були використані для контролю радіаційних полів після аварії на ЧАЕС [2].

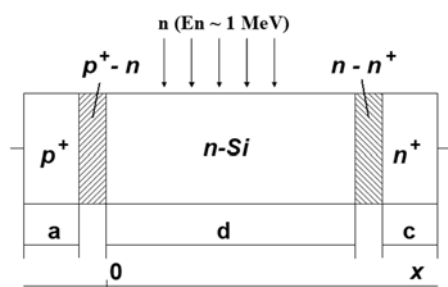


Рис. 1. Геометрія p-i-n діода

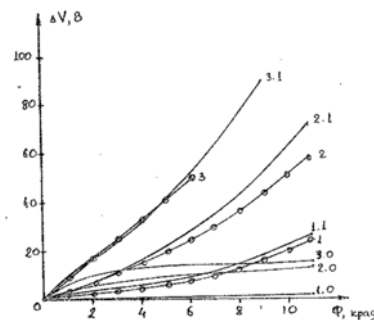


Рис. 2. Залежність зміни падіння напруги на базі p-i-n діоду від дози опромінення.

На основі цих результатів розроблено підходи до створення універсальних сенсорів для нейтронної та змішаної дозиметрії. Запропоновано методи одночасного визначення неіонізаційних та іонізаційних втрат енергії за допомогою одного p-i-n діода, що є важливим для застосувань у складних радіаційних середовищах [3].

Окремий напрям досліджень присвячено кремнієвим стрип-детекторам. Розв'язання двовимірної задачі розподілу електричного поля з урахуванням поперечної компоненти дозволило уточнити механізми збирання заряду та досягти просторової роздільної здатності на рівні декількох мікрон.

Результати були застосовані для розробки позиційно-чутливих детекторів заряджених частинок та нейтронів [4].

Подальший розвиток робіт пов'язаний із медичними застосуваннями, зокрема дозиметрією інтенсивного синхротронного випромінювання. Показано, що при високих густинах носіїв заряду необхідно враховувати нелінійні ефекти рекомбінації, включаючи механізм Auger, що визначає залежність відгуку детекторів від потужності дози [5].

Сучасний етап досліджень спрямований на космічні застосування. Розроблено планарні р-і-n структури зі змінною довжиною бази, що дозволяє створювати сенсори з широким динамічним діапазоном для вимірювання неіонізаційних втрат енергії (NIEL) (Рис. 3-4) [6]. Такі сенсори є перспективними для моніторингу деградації електроніки та сонячних батарей у космічному середовищі.

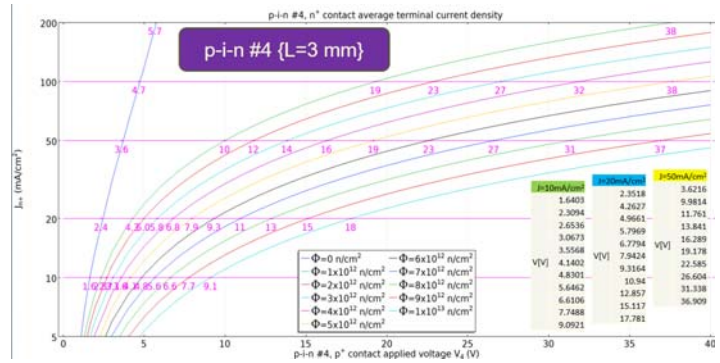
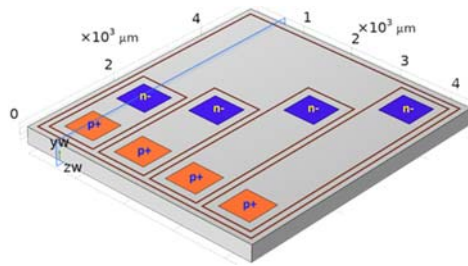
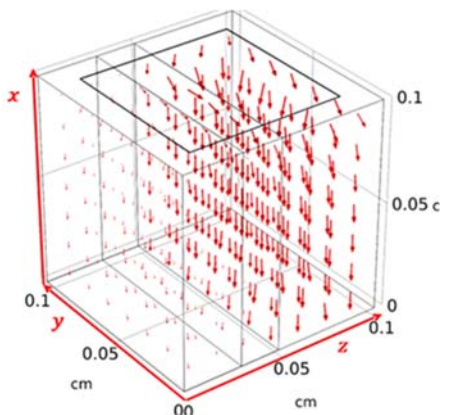
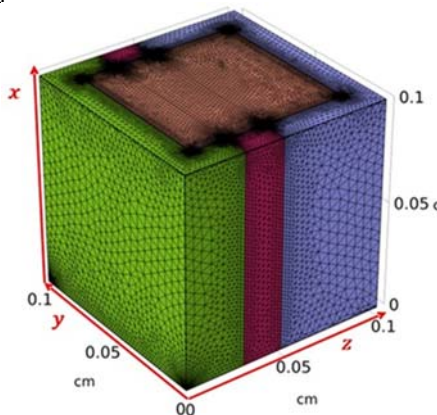
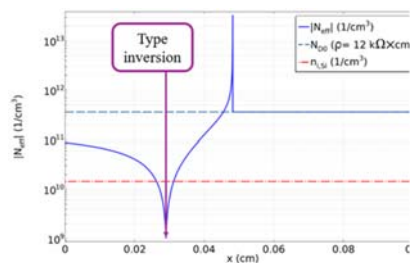


Рис. 3. Планарна структура р-і-n діодів зі змінною довжиною бази

Рис. 4. Зсув падіння напруги на планарному р-і-n діоді (#4, з довжиною бази 3 мм) від дози нейтронного опромінення.

Вперше систематично досліджено ефект часткового опромінення об'єму діода, характерний для космічних умов, де радіаційне поле є неоднорідним. Показано, що просторовий розподіл пошкоджень може призводити до систематичних похибок у визначенні NIEL, що необхідно враховувати при калібруванні сенсорів (Рис. 5) [7].



а) Розрахований розподіл ефективної концентрації домішок  $N_{eff}$  уздовж траєкторії падаючих протонів (1-D та 3-D)

б) Розрахована щільність струму

Рис. 5. Опромінення об'ємного р-і-n діода протонним пучком енергією 8 Мев з флюенсом  $\Phi = 2.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

Отримані результати демонструють еволюцію кремнієвих р-і-n діодів від аварійних дозиметрів до універсальних сенсорів для складних радіаційних середовищ. Запропоновані підходи формують основу для створення нового покоління радіаційно-стійких сенсорів, здатних забезпечити надійний моніторинг радіаційних ефектів у довготривалих космічних місіях, включаючи міжпланетні польоти.

1. I.E.Anokhin, et al., Rad Prot Dos., 2002, 101(1-4), 107-110
2. Rosenfeld A.B. et al., Rad. Prot. Dos., 1990, 1-4, 175-178
3. I.E.Anokhin, et al., Nuclear Physics and Atomic Energy, 2007, N1(19), 103-108,
4. Anokhin I.E., Zinets O.S., NIM A, 2002. A477(1-3), 110-113
5. Igor E. Anokhin, et al., 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Conference Records NP-44, 164
6. I. E. Anokhin, et al., 2023 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and International Symposium on Room-Temperature Semiconductor Detectors, Conference paper, 1-1
7. D.J.Bennett, et al., The 2025 Nuclear and Space Radiation Effects Conference, Conference paper, 1-1