

УДК 621.315.592

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-9

Луцький С. В.

Луцький національний технічний університет

РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge

Досліджено залежності питомого опору від потоку електронного опромінення з енергією 10 MeV для монокристалів германію, легованих домішкою сурми, при різних температурах. Для всіх одержаних залежностей характерним є наявність максимуму, який пов'язаний з максимальним ступенем компенсації опромінених монокристалів n-Ge та найбільш ефективним розсіянням електронів на утворених радіаційних дефектах для певного потоку опромінення. Встановлено, що при підвищенні температури питомий опір n-Ge зменшується за рахунок іонізації глибоких рівнів радіаційних дефектів та зростання рухливості носіїв струму. Для потоків $\Phi \geq 2 \cdot 10^{16}$ ел./см² спостерігається значне зменшення питомого опору германію при переході через максимум, що пояснюється зростанням концентрації носіїв струму внаслідок n-p-конверсії типу провідності германію. Найбільшу радіаційну стійкість до електронного опромінення мають монокристали n-Ge, опромінені кратно меншими потоками електронів за $\Phi = 5 \cdot 10^{15}$ ел./см² або потоками $\Phi > 2 \cdot 10^{16}$ ел./см². Одержані результати є важливими при конструюванні та експлуатації електронних приладів та сенсорів, виготовлених на основі германію, які функціонують в полях підвищеної радіації.

Ключові слова: монокристали n-Ge, електронне опромінення, питомий опір, радіаційні дефекти, радіаційна стійкість, ступінь компенсації.

Постановка проблеми. Враховуючи те, що тривалість роботи ядерних та термоядерних реакторів, експлуатація космічних апаратів повинна бути не менше 10 років, то протягом цього ж часу повинні неперервно "працювати" і матеріали електроніки, яка використовується в автоматичні таких систем [1-3]. В іншому ж випадку такі матеріали будуть економічно не вигідними. Випромінювання космосу та реакторів призводить до змін структури цих матеріалів та, відповідно, їх міцності, електричних та інших властивостей. Тому також важливими вимогами, які висуваються до електроніки, яка має функціонувати в полях підвищеної радіації, є точність та стабільність її параметрів. А це, в свою чергу, вимагає проведення досліджень впливу різного роду випромінювань на матеріали електроніки та електронні прилади, розробки нових підходів та технологій стабілізації робочих характеристик цих приладів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш уразливими елементами електроніки до впливу проникаючої радіації є напівпровідникові матеріали. Тому сьогодні основною задачею науковців та інженерів є забезпечення надійного та тривалого функціонування таких елементів та, відповідно, напівпровідникової електроніки в цілому в умовах підвищеного радіаційного фону [4-7]. В монографії [4] розглядаються наукові основи одержання радіаційно-стійких датчиків Холла та контрольно-вимірювальної апаратури для термоядерних реакторів та прискорювачів заряджених частинок. В роботах [5-7] вивчався вплив космічного випромінювання на функціональну надійність пристроїв мікроелектромеханічних систем (МЕМС), що є важливим для застосувань у верхніх шарах атмосфери та космосі. Було встановлено, що чутливість МЕМС, робота яких базується на електростатичних принципах, до випромінювання сильно залежить від ступеня накопичення захопленого заряду в діелектриках. Термічно ж або електромагнітно керовані MEMS набагато більш стійкі до радіації. МЕМС, що працюють на основі п'єзорезистивних принципів, починають повільно деградувати при низьких поглинутих дозах радіації, але їх параметри не виходять за катастрофічну межу збоїв до доз у кілька Мрад. В роботі [8] проведений детальний огляд різних матеріалів, стійких до опромінення, розглянуті параметри радіаційної стійкості та способи її оцінки, можливість застосування цих матеріалів в ядерних реакторах. Германій та кремній на сьогодні є базовими матеріалами мікро- та наноелектроніки [9-13]. Огляд сучасних робіт показує, що науковці прийшли до висновку щодо заміни кремнію на германій, оскільки він має більшу рухливість носіїв струму, та створені на основі нього, наприклад, МОН-транзистори матимуть більшу швидкодію [10, 14-16]. Тому актуальним щодо пошуку умов, за який забезпечується радіаційна стійкість германію та приладів, виготовлених на його основі, є вивчення впливу іонізуючого випромінювання на електричні властивості даного матеріалу, зокрема питомий опір.

Мета та основні завдання роботи. Метою дослідження є встановлення зв'язку між радіаційною стійкістю монокристалів германію та величиною потоком електронного опромінення. Для досягнення даної мети необхідним є вирішення наступних задач:

1. Провести дослідження електропровідності та визначити питомий опір опромінених електронами монокристалів n-Ge для різних температур та потоків опромінення.

2. Встановити вплив дефектної структури, створеної радіаційними дефектами, контрольованими та неконтрольованими домішками, на радіаційну стійкість досліджуваних монокристалів n-Ge.

Результати та їх обговорення. Нами досліджувались залежності питомого опору монокристалів n-Ge, вирощених за методом Чохральського та легованих домішкою сурми, концентрацією $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, від потоку електронного опромінення з енергією 10 МеВ. Опромінювання зразків германію потоками електронів від $5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$ до $5 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$ проводилося на мікротроні М-30, у відділі фотоядерних процесів Інституту електронної фізики НАН України (м. Ужгород). Параметри мікротрона дозволяють формувати пучки прискорених електронів з енергіями в діапазоні 1–25 МеВ із моноенергетичністю 0,02% та струмом до 50 мкА. На рис. 1 та рис. 2 представлено результати вимірювань температурних залежностей питомого опору n-Ge від потоку опромінення електронами. Як слідує з даних рисунків, всі залежності $\rho = f(\Phi)$ характерним мають максимум, величина якого зменшується зі збільшенням температури. Також зростання температури призводить до зміщення цього максимуму в область менших потоків електронного опромінення.

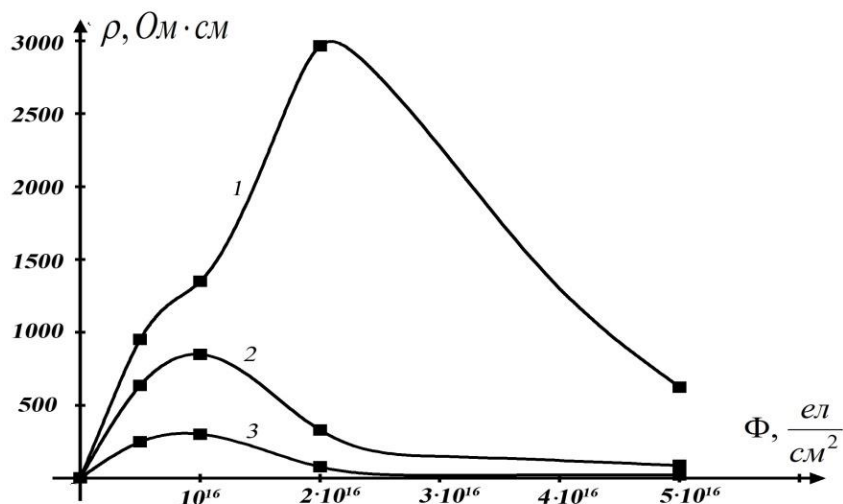


Рисунок 1 – Залежності питомого опору n-Ge від потоку електронного опромінення для різних температур T, К: 1 – 200; 2 – 225; 3 – 250.

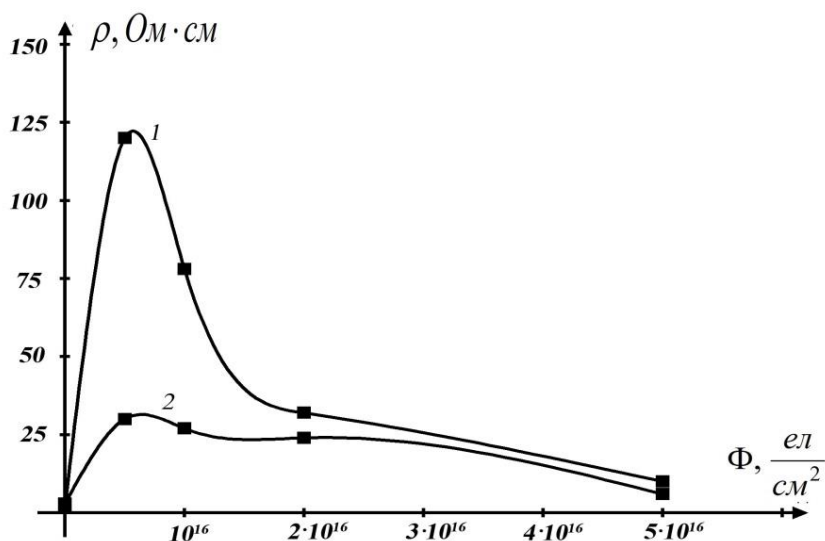


Рисунок 2 – Залежності питомого опору n-Ge від потоку електронного опромінення для різних температур T, К: 1 – 275; 2 – 300.

Згідно з одержаними результатами попередніх наших робіт [17-19], електронне опромінення монокристалів n-Ge призводить до утворення в їх об'ємі точкових дефектів, що належать кисневмісним комплексам $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$, а також складні дефекти – області розвпорядкування. Комплекс $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ відноситься до А-центру, який модифікований двома міжвузловими атомами германію [20]. Він утворюється в монокристалах кремнію та германію з високим вмістом неконтрольованої домішки міжвузлового кисню O_i , яка вводиться в об'ємі даних монокристалів при вирощуванні в атмосфері повітря. Тому ця домішка відіграє важливу роль в процесах дефектоутворення при електронному опроміненні в монокристалах n-Ge. Експериментально виявлені в роботі [21] смуги поглинання $716, 620$ та 669 см^{-1} відповідають подвійному негативному, нейтральному та негативному зарядовому стану А-центру відповідно. Комплекс $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ створює в забороненій зоні германію глибокі енергетичні рівні $E_c - 0,27 \text{ eV}$ та $E_v + 0,27 \text{ eV}$. Утворення таких комплексів дефектів при електронному опроміненні збільшує ступінь компенсації монокристалів n-Ge, що призводить до зменшення концентрації та, відповідно, зростання питомого опору германію. При цьому рухливість носіїв струму теж зменшується, оскільки утворені радіаційні дефекти є активними центрами розсіяння [17, 18]. Ступінь компенсації опромінених монокристалів n-Ge буде зменшуватись при збільшенні температури, що є основною причиною зменшення питомого опору та величини максимуму для залежностей $\rho = f(\Phi)$ рис. 1 та рис. 2. Також при збільшенні температури рухливість носіїв струму буде зростати за рахунок зменшення ролі їх розсіяння на радіаційних дефектах, що є ще однією причиною зменшення питомого опору. Як було встановлено в роботі [19], при потоках $\Phi \geq 2 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$ германій за рахунок накопичення в його об'ємі значної концентрації комплексів $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ конвертував у р-тип. Це призвело до зростання концентрації носіїв струму та значного зменшення, як слідує з рис. 1 та рис. 2, питомого опору германію для таких потоків опромінення.

Висновки. Встановлено, що питомий опір n-Ge зростає при збільшенні потоку електронного опромінення, особливо при низьких температурах та до n-p-конверсії типу його провідності. Це пояснюється двома причинами: 1) збільшенням ступеня компенсації опромінених монокристалів германію, що призводить до значного зменшення концентрації електронів провідності; 2) зростанням ролі розсіяння електронів на утворених радіаційних дефектах, що впливає на зменшення рухливості електронів.

1. Встановлено, що при потоках $\Phi \geq 2 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$ спостерігається значне зменшення питомого опору германію при переході через максимум, що пояснюється зростанням концентрації носіїв струму внаслідок n-p-конверсії. Для області кімнатної температури питомий опір n-Ge практично не змінився при опроміненні такими потоками електронів.

2. Проведений аналіз залежностей $\rho = f(\Phi)$ показує, що найбільшу радіаційну стійкість мають монокристали германію, які опромінювались або малими, кратно меншими за $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ ел./см}^2$, або $\Phi > 2 \cdot 10^{16} \text{ ел./см}^2$ потоками електронів.

3. Проведені дослідження радіаційної стійкості монокристалів n-Ge до дії електронного опромінення необхідно враховувати при експлуатації електронних приладів та сенсорів, виготовлених на основі германію, в умовах ядерних випромінювань (автоматика ядерних реакторів, атомних електростанцій, прискорювачів ядерних частинок, космічних апаратів).

Інформаційні джерела

1. Comprehensive nuclear materials / R. Konings, R. E. Stoller. 2020. Elsevier; 2nd edition. 4868 p.
2. Malerba L., Mazouzi Al, Bertolus A., Cologna M., Efsing P., Jianu A., Tarantino M. (2022). Materials for sustainable nuclear energy: a European strategic research and innovation agenda for all reactor generations. 2022. *Energies*. Vol. 15(5). P. 1845.
3. Meschini S., Laviano F., Ledda F., Pettinari D., Testoni R., Torsello D., Panella B. Review of commercial nuclear fusion projects. 2023. *Frontiers in Energy Research*. Vol. 11. P. 1157394.
4. Bolshakova I., Holyaka R., Marusenkova T., Shurygin F. Radiation-resistant Hall Magnetic Field Sensors and Instrumentations: monograph / Primedia eLaunch LLC, 2023. 148 p.
5. Janioud P., Poulain C., Koumela A., Armani J. M., Dupret A., Rey P., Morfouli P. (2020). Effects of gamma radiation on suspended silicon nanogauges bridge used for MEMS transduction. 2020. *Microelectronics Reliability*. Vol. 114. P. 113736.

6. Lynes D.D., Chandrahali H., Bevins J. E., Petrosky J. C. Effects of gamma ray radiation on the performance of microelectromechanical resonators. *Advanced Engineering Materials*. 2023. Vol. 25, P. 2201837.
7. Tilli M., Paulasto-Kröckel M., Petzold M., Theuss H., Motooka T., Lindroos V. (Eds.). Handbook of silicon based MEMS materials and technologies / Elsevier, 2020. 1026 p.
8. Su Y., Ye Y. The Review of Types of Radiation Resistance Materials and Proposed Experiments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2386, No. 1, p. 012090.
9. Chen S., Zhang Y., Hong X., Li J. Technologies and applications of silicon-based micro-optical electromechanical systems: A brief review. *Journal of Semiconductors*. 2022. Vol. 43. P. 081301.
10. Zhao F., Feng Y., Feng W. Germanium-based mono-elemental and binary two-dimensional materials: Theoretical and experimental investigations and promising applications. *InfoMat*. 2022. Vol. 4, P. 1-82.
11. Patel M., Karamalidis A. K. Germanium: A review of its US demand, uses, resources, chemistry, and separation technologies. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 275. P. 118981.
12. Luniov S. V., Lyshuk V. V., Maslyuk V. T., Burban O. V. Mechanisms of electron scattering in uniaxially deformed silicon single crystals with radiation defects. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. Vol. 56. P. 45–57.
13. Jaikissoon M., Köroğlu Ç., Yang J. A., Neilson K. M., Saraswat K. C., Pop E. CMOS-compatible strain engineering for high-performance monolayer semiconductor transistors, 2024. P. 885-891 (arXiv preprint arXiv:2405.09792).
14. Krishna C. Saraswat. Germanium in 75th Anniversary of the Transistor. *IEEE*, 2023. P. 415–429.
15. Luniov S.V., Burban O.V., Nazarchuk P.F. Calculation of the Electron Mobility for the Δ_1 -Model of the Conduction Band of Germanium Single Crystals. *Semiconductors*. 2014. Vol. 48, №4. P. 438–441.
16. Luniov S.V., Burban O.V., Nazarchuk P.F. Electron scattering in the Δ_1 -model of the conduction band of germanium crystals. *Semiconductors*. 2015. Vol. 49, №5. P. 574–578.
17. Luniov S.V., Zimych A.I., Nazarchuk P.F., Maslyuk V.T., Megela I.G. The impact of radiation defects on the mechanisms of electron scattering in single crystals n-Ge. *Journal of Physical Studies*. 2015. Vol. 19, №4. P. 4704.
18. Luniov S.V., Zimych A.I., Nazarchuk P.F., Maslyuk V.T., Megela I.G. Specific features of electron scattering in uniaxially deformed n-Ge single crystals in the presence of radiation defects. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2016. Vol. 171, Issue 11–12. P. 855–868.
19. Luniov S.V., Zimych A.I., Nazarchuk P.F., Maslyuk V.T., Megela I.G. Radiation defects parameters determination in n-Ge single crystals irradiated by high-energy electrons. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2016. Vol. 17, Issue 1. P. 47–52.
20. Dolgolenko A. P. Modification of radiation defects in Si and Ge by background impurity. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2013. Vol. 14. P. 377–383.
21. Markevich V. P., Litvinov V. V., Dobaczewski L. et al. Vacancy-oxygen complex in Ge crystals. *Physica B: Condensed Matter*. 2003. Vol. 340. P. 844–848.

Luniov S.

Lutsk National Technical University

RADIATION STABILITY OF ELECTRON-IRRADIATED n-Ge SINGLE CRYSTALS

The dependences of the resistivity on the electron irradiation flow with the energy of 10 MeV for germanium single crystals, doped by the antimony at different temperatures were investigated. All the obtained dependences are characterized by the presence of a maximum, which is associated with the maximum degree of compensation of the irradiated n-Ge single crystals and the most effective scattering of electrons on the created radiation defects for a certain irradiation flow. It was established that the resistivity of n-Ge decreases due to the ionization of deep levels of radiation defects and an increase in the mobility of current carriers with increasing temperature. A significant decrease in the resistivity of germanium is observed when passing through the maximum for the flows of $\Phi \geq 2 \cdot 10^{16}$ el./cm², which is explained by an increase in the concentration of current carriers due to the n-p-conversion of the conductivity type of germanium. The highest radiation resistance to electron irradiation is possessed by n-Ge single crystals, irradiated by multiple smaller electron flows than

$\Phi=5 \cdot 10^{15}$ el./cm² or flows of $\Phi > 2 \cdot 10^{16}$ el./cm². The obtained results are important in the design and operation of electronic devices and sensors made on the basis of germanium that operate in fields of increased radiation.

Key words: n-Ge single crystals, electron irradiation, resistivity, radiation defects, radiation resistance, degree of compensation.