

УДК 621.315.592

DOI 10.36910/6775-2313-5352-2022-20-10

Луцьков С.В., Цизь А.І.

Луцький національний технічний університет

### ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ТЕНЗОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ $\gamma$ -ОПРОМІНЕНИХ МОНОКРИСТАЛІВ n-Si

Дослідженні електричні властивості та тензорезистивний ефект при одновісному тискові вздовж кристалографічного напрямку [100] для неопромінених та  $\gamma$ -опромінених монокристалів кремнію, легованих домішкою фосфору, при температурі рідкого азоту та кімнатній. На основі вимірювань ефекту Холла було встановлено, що при збільшенні дози  $\gamma$ -опромінення зменшується концентрація та рухливість електронів в монокристалах n-Si. Значне зменшення концентрації електронів при  $T=77$  К для опромінених дозою  $\Phi=5\cdot 10^8$  Р монокристалів n-Si пов'язане з утворенням при  $\gamma$ -опроміненні значної концентрації акцепторних рівнів радіаційних дефектів (А- та Е-центрів, дивакансій та інших). Для доз  $\gamma$ -опромінення  $\Phi < 5\cdot 10^7$  Р наявність тензорезистивного ефекту n-Si пояснюється зменшенням рухливості електронів при одновісному тискові, оскільки концентрація електронів практично залишається сталою. Зменшення питомого опору при переході через максимум залежності для  $\gamma$ -опромінених дозою  $\Phi=5\cdot 10^8$  Р монокристалів n-Si пов'язане зі зростанням концентрації електронів за рахунок іонізації локальних рівнів радіаційних дефектів при збільшенні одновісного тиску. Експериментальні вимірювання ефекту Холла та тензорезистивного ефекту добре корелюють з одержаними залежностями коефіцієнта тензочутливості. З аналізу даних залежностей слідує, що збільшення температури та дози  $\gamma$ -опромінення призводить до зменшення коефіцієнта тензочутливості n-Si. Одержані результати можуть знайти своє практичне використання для конструювання радіаційно стійких сенсорів тиску на основі монокристалів n-Si.

**Ключові слова:** монокристали n-Si,  $\gamma$ -опромінення, тензорезистивний ефект, коефіцієнт тензочутливості, одновісний тиск, рухливість електронів.

**Постановка проблеми.** Розвиток ядерної та термоядерної енергетики, атомної та космічної техніки стимулювало дослідження впливу ядерного випромінювання на властивості твердих тіл. Такі дослідження дозволяють отримувати за допомогою дуже чутливих та тонких кількісних методів важливу інформацію про характер та природу структурних порушень в кристали, пов'язаних з утворенням різного роду дефектів або домішок [1]. Модифікація властивостей твердих тіл за допомогою ядерного випромінювання є потужним інструментом спрямованої зміни властивостей твердих тіл для створення нових матеріалів та приладів із заданими характеристиками [2, 3]. Для керування параметрами напівпровідникових приладів в умовах підвищеної радіації необхідні фундаментальні дослідження механізмів утворення та природи радіаційних дефектів. Значна увага в даному відношенні приділяється сенсорам тиску, які широко використовуються в різних галузях науки та техніки [4, 5]. Тензочутливість напівпровідникових тензодатчиків у 50–60 разів більша, ніж дротяних [6]. Одним з таких перспективних напівпровідникових матеріалів для тензодатчиків є кремній, який був і залишається основним матеріалом мікроелектроніки [2, 7]. Це пояснюється рядом його унікальних фізичних та хімічних властивостей, таких як доступність, відносно низька вартість, добре розроблена технологія очищення, обробки та легування, що забезпечує високу ступінь кристалографічної досконалості виготовлених структур. Дослідження радіаційної стійкості кремнію важливе з точки зору довготривалої роботи приладів на його основі на атомних реакторах, прискорювачах ядерних частинок, в космосі, тощо [3, 5]. Необхідність створення радіаційно стійких сенсорів для вимірювання механічних величин (деформації, тиску та ін.) обумовлена потребами ряду областей науки і техніки [8]. У зв'язку з цим становить значний науковий інтерес дослідження впливу  $\gamma$ -опромінення на електричні характеристики монокристалів кремнію.

**Основне завдання та одержані результати роботи.** Метою дослідження є отримання взаємозв'язків між дефектною структурою монокристалів n-Si, створеною за рахунок  $\gamma$ -опромінення, та електричними і тензоелектричними властивостями даних монокристалів. Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати наступні задачі:

1. На основі вимірювань ефекту Холла визначити концентрацію та рухливість носіїв струму в опромінених  $\gamma$ -квантами монокристалах кремнію, легованих домішкою фосфору, концентрацією  $N_d = 1,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , при температурі рідкого азоту та кімнатній.
2. Дослідити тензорезистивний ефект при одновісному тискові вздовж кристалографічного напрямку [100] для неопромінених та опромінених різними дозами  $\gamma$ -квантів монокристалів n-Si при даних температурах.
3. Одержати залежності коефіцієнта тензочутливості від одновісного тиску для даних монокристалів n-Si.

Концентрація та рухливості електронів, визначені на основі вимірювань ефекту Холла для неопромінених та  $\gamma$ -опромінених монокристалів n-Si, представленні в табл. 1. Слід відмітити, що для досліджуваних доз  $\gamma$ -опромінення не відбувалась n-p-конверсія типу провідності кремнію.

Таблиця 1.

Результати холлівських вимірювань для досліджувальних зразків n-Si

Температура вимірювань	T=290 К			T=77 К		
	Доза опромінення $\Phi, \text{P}$	0	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^8$	0	$5 \cdot 10^7$
Концентрація електронів n, $\text{см}^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$9 \cdot 10^{13}$	$6 \cdot 10^{11}$
Рухливість електронів $\mu, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1900	1880	1580	20800	19900	9600

Згідно з табл. 1, при збільшенні дози  $\gamma$ -опромінення зменшується концентрація та рухливість електронів в монокристалах n-Si. Значне зменшення концентрації електронів при T=77 К для опромінених дозою  $\Phi=5 \cdot 10^8 \text{ P}$  монокристалів n-Si пов'язане з утворенням при  $\gamma$ -опроміненні різного роду радіаційних дефектів з акцепторними глибокими рівнями (в різних концентраціях), які можуть локалізувати електрони. Як відомо [9], до таких дефектів можуть належати А- та Е-центри, дивакансії, комплекси VOiP та CiOi, інші складні комплекси, до складу яких входять вуглець та кисень. Проте, в даній роботі природа утворених в n-Si радіаційних дефектів не встановлювалась, оскільки це не було метою дослідження. Зростання температури до T=290 К призводило до іонізації рівнів утворених радіаційних дефектів та відповідно до зростання концентрації електронів. Дані дефекти будуть виконувати роль компенсуючих центрів по відношенню до основних носіїв струму. Тому збільшення концентрації таких центрів при зростанні дози  $\gamma$ -опромінення призводило до утворення градієнтів питомого опору та відповідно до зменшення рухливості електронів [10].

На рис. 1 та рис. 2. представлені результати досліджень тензорезистивного ефекту для неопромінених та опромінених різними дозами  $\gamma$ -квантів монокристалів n-Si при T=77 К та T=300 К, коли одновісний тиск направлений вздовж кристалографічного напрямку [100].

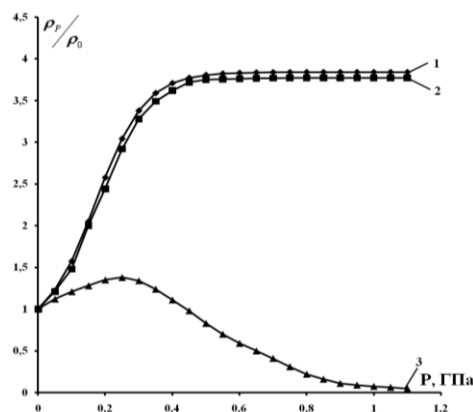


Рис. 1. Тензорезистивний ефект монокристалів n-Si при одновісному тиску  $P//[100]$  та T=77 К для різних доз  $\gamma$ -опромінення  $\Phi, \text{P}$ : 1 – 0; 2 –  $5 \cdot 10^7$ ; 3 –  $5 \cdot 10^8$ .

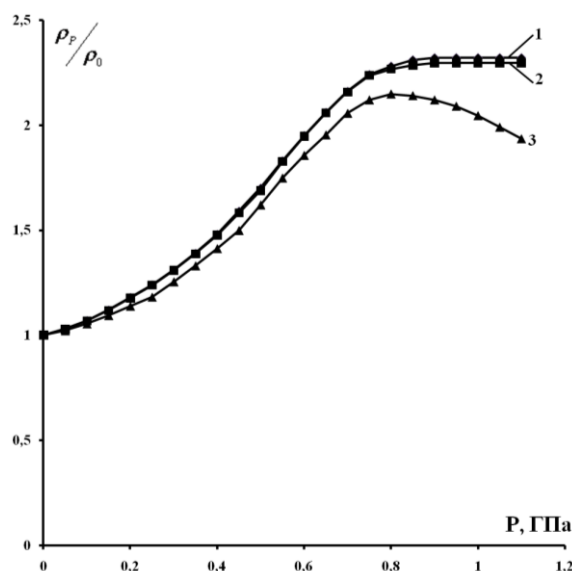


Рис. 2. Тензорезистивний ефект монокристалів n-Si при одновісному тискові P//[100] та T=290 К для різних доз  $\gamma$ -опромінення  $\Phi$ , P: 1 – 0; 2 –  $5 \cdot 10^7$ ; 3 –  $5 \cdot 10^8$ .

Оскільки концентрація електронів для неопромінених та для  $\gamma$ -опромінених дозою  $\Phi=5 \cdot 10^7$  Р монокристалів n-Si в широкому температурному інтервалі практично залишається сталою, то наявність тензорезистивного ефекту для даних випадків (рис. 1 та рис. 2, криві 1, 2) пояснюється зменшенням рухливості електронів при збільшенні одновісного тиску. Як відомо [10], при одновісному тискові вздовж кристалографічного напрямку [100] в кремнії відбувається перерозподіл електронів між двома долинами зони провідності з меншою рухливістю, які опускаються вниз, та чотирма долинами з більшою рухливістю, які піднімаються вгору, при деформації. Це призводить до зменшення ефективної рухливості та відповідно до зростання питомого опору. Зменшення питомого опору при переході через максимум залежності  $\rho_P/\rho_0 = f(P)$  для  $\gamma$ -опромінених дозою  $\Phi=5 \cdot 10^8$  Р монокристалів n-Si (рис. 1 та рис. 2, криві 3) пов'язане з іонізацією глибоких рівнів радіаційних дефектів за рахунок деформації, внаслідок чого концентрація електронів зростає.

Технічним параметром, який характеризує тензочутливість матеріалу є коефіцієнт тензочутливості. Коефіцієнт тензочутливості при одновісній деформації виражається виразом [10]:

$$S = \frac{E_{Ю} \left( \frac{\rho_P}{\rho_0} - 1 \right)}{P}, \tag{1}$$

де  $\frac{\rho_P}{\rho_0}$  – відношення питомого опору деформованого зразка до недеформованого,  $E_{Ю}$  – модуль Юнга. Для кремнію при одновісному тискові вздовж кристалографічного напрямку [100]  $E_{Ю} = 1,3 \cdot 10^{11}$  Па [12].

Враховуючи обчислене значення модуля Юнга та експериментальні результати тензорезистивного ефекту монокристалів n-Si (рис. 1 та рис. 2), можна отримати залежності коефіцієнта тензочутливості від одновісного тиску для неопромінених та  $\gamma$ -опромінених монокристалів n-Si (рис. 2.4 та рис. 2.5). Як слідує з рис. 2.4 (крива 1), максимальне значення коефіцієнта тензочутливості ( $S=1060$ ) можна досягнути при одновісному деформуванні  $P \sim 0,3$  ГПа для неопромінених монокристалів n-Si вздовж кристалографічного напрямку [100]. При більших тисках коефіцієнт тензочутливості монотонно зменшується. Незначне зменшення величини максимуму коефіцієнта тензочутливості спостерігається для  $\gamma$ -опромінених дозою  $\Phi=5 \cdot 10^7$  Р монокристалів n-Si. При збільшенні дози опромінення n-Si до  $\Phi=5 \cdot 10^8$  Р величина коефіцієнта тензочутливості в досліджуваному діапазоні одновісних тисків значно зменшується. Крім того, для даного випадку коефіцієнт тензочутливості зменшується при

одновісному тискові до 0,8 ГПа і при більших тисках залишається практично сталим (рис. 3, крива 3).

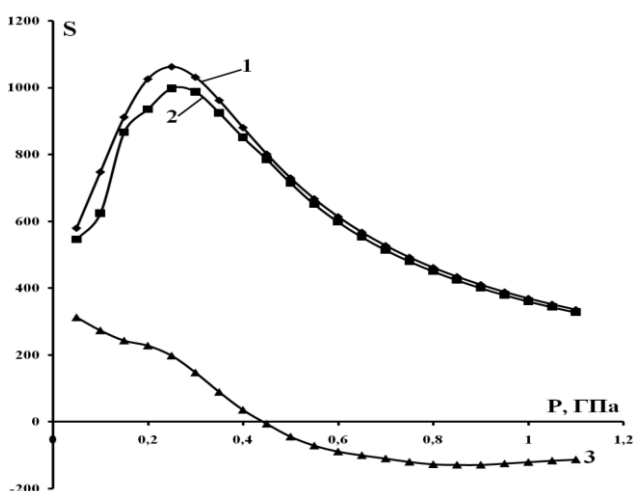


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тензочутливості *n*-Si від одновісного тиску  $P//[100]$  при  $T=77$  К для різних доз  $\gamma$  – опромінення  $\Phi$ , P: 1 – 0; 2 –  $5 \cdot 10^7$ ; 3 –  $5 \cdot 10^8$ .

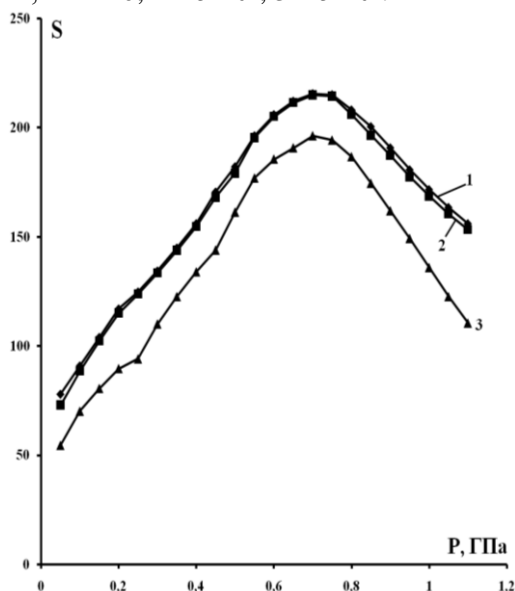


Рис. 4. Залежність коефіцієнта тензочутливості *n*-Si від одновісного тиску  $P//[100]$  при  $T=290$  К для різних доз  $\gamma$  – опромінення  $\Phi$ , P: 1 – 0; 2 –  $5 \cdot 10^7$ ; 3 –  $5 \cdot 10^8$ .

При підвищенні температури до кімнатної для неопромінених та  $\gamma$ -опромінених дозою  $\Phi=5 \cdot 10^7$  Р монокристалів *n*-Si величина максимуму коефіцієнта тензочутливості практично однакова (рис. 4, криві 1 та 2). Незначне зменшення даного максимуму спостерігається для дози  $\Phi=5 \cdot 10^8$  Р.

### Висновок

1. Результати вимірювань ефекту Холла показують, що при збільшенні дози  $\gamma$ -опромінення зменшується концентрація та рухливість електронів в монокристалах *n*-Si. Суттєве зменшення концентрації електронів при  $T=77$  К для опромінених дозою  $\Phi=5 \cdot 10^8$  Р монокристалів *n*-Si пов'язане з утворенням при  $\gamma$ -опроміненні значної концентрації радіаційних дефектів з акцепторними рівнями, які можуть локалізувати електрони.

2. Встановлено, що збільшення температури та дози  $\gamma$ -опромінення призводить до зменшення величини тензоопору та коефіцієнта тензочутливості для *n*-Si, одновісно деформованого вздовж кристалографічного напрямку  $[100]$ .

3. Для доз  $\gamma$ -опромінення  $\Phi < 5 \cdot 10^7$  Р наявність тензорезистивного ефекту в *n*-Si в даних умовах пояснюється зменшенням рухливості електронів при одновісному тискові. Зменшення

питомого опору при переході через максимум залежності  $\rho_p / \rho_0 = f(P)$  для  $\gamma$ -опромінених дозою  $\Phi=5 \cdot 10^8$  Р монокристалів *n-Si* пов'язане із зростанням концентрації електронів за рахунок іонізації радіаційних дефектів при деформації.

4. Отриманні залежності тензоопору та коефіцієнта тензочутливості дозволили встановити, що *n-Si* при кімнатній температурі є радіаційно стійким до доз  $\gamma$ -опромінення  $\Phi < 5 \cdot 10^7$  Р. Дані результати можуть бути використанні для конструювання радіаційно стійких сенсорів тиску, які працюватимуть в полях підвищеної радіації.

#### Інформаційні джерела

1. Углов В. В. Радиационные эффекты в твердых телах. Минск: БГУ, 2007. 167 с.
2. William Andrew. Handbook of silicon based MEMS materials and technologies, edited by M. Tilli, M. Paulasto-Krockel, T. Motooka [and others]. 2015. 826 p.
3. Applications of Ionizing Radiation in Materials Processing: Vol. 1. Y. Sun, A. G. Chmielewski. Warszawa: Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 2017. 244 p.
4. Low-temperature semiconductor mechanical sensors. I. Maryamova, A. Druzhinin, E. Lavitska. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2000. V. 85(1-3). P. 153–157.
5. Radiation Resistance of MEMS Sensors and Methods of Its Estimation. A.I. Vlasov, S. Milesin, T.A. Tsivinskaya. *Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development*. 2018. V. 4. P. 190–196.
6. Вплив тиску на параметри напівпровідникових структур. В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, Н.Л. Білоконь, А.О. Кривошея. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2009. №1. С. 1–5.
7. Semiconductor Silicon Crystal Technology / S. Fumio. Elsevier Science & Technology, 2012. 435 p.
8. Исследование влияния электронного облучения на кремниевые тензорезисторы. А.А. Дружинин, И. И. Марьямова, А. П. Кутраков, Н.С. Лях – Кагуй, В. Т. Маслюк, И. Г. Мегела. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2010, Т.1. С. 26–29.
9. Specific features of defect formation in the *nSi* single crystals at electron irradiation / S. Luniov, A. Zimych, M. Khvyshchun, M. Yevsiuk, V. Maslyuk. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6, № 12(96). P. 35–42.
10. Mechanisms of electron scattering in uniaxially deformed silicon single crystals with radiation defects. S. V. Luniov, V. V. Lyshuk, V. T. Maslyuk, O. V. Burban. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. V. 56(5). P. 45–57.
11. Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах / В. П. Савчин, Р. Я. Шувар. Л.: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. 687 с.
12. Полякова А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. М.: Наука, 1979. 168 с.

**Luniov S. V., Tsyz A. I.**

Lutsk National Technical University

#### ELECTRICAL AND TENSOELECTRICAL PROPERTIES OF THE $\gamma$ -IRRADIATED *n-Si* SINGLE CRYSTALS

*The electrical properties and tensoresistive effect at the uniaxial pressure along the crystallographic direction [100] for unirradiated and  $\gamma$ -irradiated silicon single crystals, doped by the phosphorus impurity were investigated at the liquid nitrogen and room temperature. Based on measurements of the Hall effect, it was established that increasing the dose of  $\gamma$ -irradiation is decreasing the concentration and mobility of electrons in *n-Si* single crystals. A significant decrease of the electron concentration at  $T=77$  K for irradiated *n-Si* single crystals by the dose of  $\Omega=5 \cdot 10^8$  R is associated with the formation at  $\gamma$ -irradiation of a significant concentration of the acceptor levels of radiation defects (A- and E-centres, divacancies and others). For doses of  $\gamma$ -irradiation  $\Omega < 5 \cdot 10^7$  R, the presence of the tensoresistive effect of *n-Si* is explained by the decrease in the electron mobility under the uniaxial pressure since the electron concentration practically remains constant. The decrease in resistivity at the transition through the maximum dependence for the  $\gamma$ -irradiated *n-Si* single crystals by the dose of  $\Omega=5 \cdot 10^8$  R is associated with the increasing electron concentration due*

*to ionization of the local levels of radiation defects with increasing the uniaxial pressure. Experimental measurements of the Hall effect and tensorial resistive effect correlate well with the obtained dependences of the tensorial sensitivity coefficient. From the analysis of these dependencies, it follows that an increase in temperature and dose of  $\gamma$  -radiation leads to a decrease in the tensorial sensitivity coefficient of n-Si. The obtained results can find their practical application for the design of radiation-resistant pressure sensors based on n-Si single crystals.*

**Key words:** *n-Si single crystals,  $\gamma$ -irradiation, strain-resistance effect, strain-sensitivity coefficient, uniaxial pressure, electron mobility.*