

УДК 535.21:538.9
PACS number(s): 71.20.Lp:61.80.-x:42.62.-b

ЗМІНА ПАРАМЕТРА АНІЗОТРОПІЇ РУХЛИВОСТІ В n -Ge ЗАЛЕЖНО ВІД ДОЗИ γ -ОПРОМІНЕННЯ ТА ПІДСВІЧУВАННЯ

Д. Захарчук

*Луцький державний технічний університет,
вул. Львівська, 75, Луцьк 43018, Україна
e-mail: zachdim@mail.ru*

Користуючись методами поздовжнього п'єзоопору та п'єзо-холл-ефекту досліджено залежності зміни параметра анізотропії рухливості та абсолютних значень компонент рухливості в поздовжньому (μ_{\parallel}) і поперечному (μ_{\perp}) напрямках відносно головної осі ізоенергетичного еліпсоїда залежно від дози γ -опромінення і рівня підсвічування в монокристалах n -Ge. Виявлено, що компонента рухливості μ_{\parallel} практично не залежить від дози γ -опромінення і рівня підсвічування для зразків, що вирізані паралельно та перпендикулярно відносно осі росту кристала, на відміну від μ_{\perp} . Відчутніші зміни μ_{\perp} простежують для зразків, в яких вузькі області більш сильної компенсації розміщені перпендикулярно до напрямку струму і механічного напруження, що зумовлено збільшенням амплітуди шарових періодичних неоднорідностей унаслідок захоплення носіїв заряду із зони провідності на глибокі рівні радіаційних дефектів.

Ключові слова: п'єзоопір, германій, ізоенергетичний еліпсоїд, рухливість.

Дослідження кінетичних ефектів в багатодолинних напівпровідниках у разі одновісної пружної деформації інформують про параметри анізотропії рухливості в ізоенергетичних еліпсоїдах, абсолютні значення рухливості в поздовжньому та поперечному напрямі щодо головної осі еліпсоїда тощо.

Дрейфова рухливість носіїв заряду в анізотропних напівпровідникових кристалах є тензором μ_{ik} , оскільки вона пропорційна до тензора провідності σ_{ik} відповідно до

$$\mu_{ik} = \frac{\sigma_{ik}}{n_e e}, \quad (1)$$

де n_e – концентрація електронів провідності, e – заряд електрона.

Компоненти тензора рухливості носіїв заряду однієї долини в головних осях тензора ефективних мас за відсутності магнітного поля визначають співвідношеннями [1]

$$\begin{aligned}\mu_{11} = \mu_{22} = \mu_{\perp} &= \frac{d_0}{n_e e_0} \int_0^{\infty} dx x^2 \frac{d^3 n}{dx} \tau_{\perp}; \\ \mu_{33} = \mu_{\parallel} &= \frac{d_0 m_{\perp}}{n_e e_0 m_{\parallel}} \int_0^{\infty} dx x^2 \frac{d^3 n}{dx} \tau_{\parallel}; \\ \mu_{ik} &= 0 \quad \text{для } i \neq k.\end{aligned}\quad (2)$$

Відношення рухливостей $\frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\parallel}}$ вздовж головних осей тензора мас для електронів однієї долини називається параметром анізотропії K :

$$K = \frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\parallel}} = \frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}} \cdot \frac{\langle \tau_{\perp} \rangle}{\langle \tau_{\parallel} \rangle}, \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned}\langle \tau_{\perp} \rangle &= \int_0^{\infty} dx x^2 \frac{d^3 n}{dx} \tau_{\perp}, \\ \langle \tau_{\parallel} \rangle &= \int_0^{\infty} dx x^2 \frac{d^3 n}{dx} \tau_{\parallel}, \\ x &= \frac{W}{kT}.\end{aligned}\quad (4)$$

Відношення $\frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}} = K_m$ є параметром анізотропії ефективних мас, а відповідно

$\frac{\langle \tau_{\perp} \rangle}{\langle \tau_{\parallel} \rangle} = K_{\tau}$ – параметр анізотропії тензора часів релаксації. Тоді, згідно з

позначеннями, параметр анізотропії рухливості становить

$$K = \frac{K_m}{K_{\tau}}. \quad (5)$$

Дослідженню анізотропії розсіяння носіїв заряду в багатодолинних напівпровідниках *Si* та *Ge* присвячена низка робіт [2–4]. Зокрема, автори [4] детально з'ясували причини зниження параметра анізотропії рухливості $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$ в *n-Ge* у разі підвищення внеску домішкового розсіяння і зроблено висновок, що на зміни внеску домішкового розсіяння реагують μ_{\perp} і K_{τ} (які пов'язані між собою виразом $\mu_{\perp} K_{\tau} = \mu_{\parallel} K_m = \text{const}$) при незмінних значеннях μ_{\parallel} та K_m . Підвищену чутливість μ_{\perp} і K_{τ} до варіації співвідношення між механізмами розсіяння треба використовувати для вивчення тих змін, до яких приводять в напівпровідниках різного роду термічні, радіаційні і інші фізико-активні впливи, які змінюються в досить широких межах. Тому виникло природне

бажання дослідити як змінюється параметр анізотропії рухливості, а зокрема залежність складових μ_{\perp} і μ_{\parallel} рухливості від дози γ -опромінення Φ в достатньо чистих кристалах n -Ge.

Для досягнення поставленої мети із злиwkів n -Ge ($\rho_{300\text{ K}} = 42 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) були вирізані дві групи зразків уздовж кристалографічного напрямку [111] (в якому реалізується максимальна тензочутливість для германію) так, щоб шари росту по-різному були розміщені відносно напрямку струму J і механічного напруження стиску X : зразки першої групи вирізані вздовж росту кристала в напрямі [111] (при цьому шари росту перпендикулярні до $J \parallel X$); зразки другої групи орієнтовані під кутом 70° відносно осі росту, але теж в напрямі [111] (при цьому шари росту приблизно паралельні до $J \parallel X$).

На зразках I і II груп були виміряні поздовжній п'єзоопір та п'єзо-холл-ефект у вихідному стані та після опромінення ^{60}Co різними дозами за температури $T = 77 \text{ K}$ в інтервалі механічних напружень $0 \div 8000 \text{ кГ/см}^2$. В обох випадках зі збільшенням дози γ -опромінення Φ концентрація радіаційних дефектів зростає і збільшується амплітуда шарової періодичної неоднорідності (ШПН). Тому спостерігається зниження параметра анізотропії $K = \mu_{\perp} / \mu_{\parallel}$, який обчислювався згідно з [1]

$$K = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_0} - \frac{1}{2}, \quad (6)$$

де ρ_0 – питомий опір при $X = 0$; $\rho_X^{[111]} = 8000 \text{ кГ/см}^2 = \rho_{\infty}^{[111]}$.

Причому для зразків першої групи, як видно із таблиці 1, спостерігається більше зниження K .

У випадку деформацій, які забезпечують повне переселення носіїв заряду у мінімуми енергії, можна записати:

$$\mu_{\parallel} = \frac{1}{en_e \rho_{\infty}^{[111]}}, \quad (7)$$

а отже, і

$$\mu_{\perp} = K \mu_{\parallel}. \quad (8)$$

За експериментальними даними (див. табл. 1) та користуючись співвідношеннями (7) і (8) побудовано залежності $\mu_{\perp} = f(\Phi)$ і $\mu_{\parallel} = f(\Phi)$ (рис. 1 та рис. 2) для двох груп зразків.

Із рис. 1 та рис. 2 видно, що компонента рухливості μ_{\parallel} (криві 1 та 1') практично не залежить від Φ для зразків різних груп на відміну від μ_{\perp} (криві 2 та 2'). Як свідчать дані циклотронного резонансу [5] для ефективних мас електрона, $K_m = m_{\parallel} / m_{\perp} = 19,3$, оскільки $m_{\perp} = 0,082 m_0$ і $m_{\parallel} = 1,58 m_0$.

Таблиця 1
Основні характеристики досліджуваних кристалів *n-Ge* при різних дозах γ -опромінення

$\Phi \cdot 10^{-16}$, $\gamma_{\text{кв}}/\text{см}^2$	ρ_0 , Ом·см	ρ_∞ , Ом·см	K	n , см^{-3} ($X=8\,000\text{кг}/\text{см}^2$)
Зразки I групи				
0	6,6	65,1	14,27	$4,97 \cdot 10^{13}$
6,4	13,1	116,4	12,85	$2,85 \cdot 10^{13}$
8,8	36,1	267,3	10,6	$1,29 \cdot 10^{13}$
11	263,3	1625	7,45	$2,34 \cdot 10^{12}$
Зразки II групи				
0	5,8	57,1	14,2	$5,60 \cdot 10^{13}$
6,4	8,6	79,4	13,3	$3,26 \cdot 10^{13}$
8,8	15,4	131,4	12,32	$2,41 \cdot 10^{13}$
11	53,3	179,5	10	$2,1 \cdot 10^{13}$

Отже, можна зробити висновок, що зниження μ_\perp при збільшенні дози опромінення (як видно із рис. 1 та рис. 2) визначається зростанням параметра анізотропії часів релаксації K_τ , тому що $\mu_\perp K_\tau = \mu_\parallel K_m = \text{const}$.

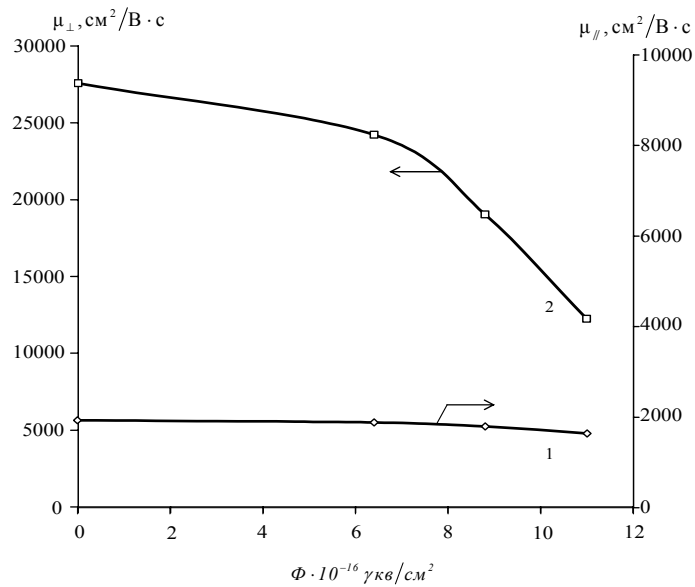


Рис. 1. Дозові залежності $\mu_\parallel = f(\Phi)$ та $\mu_\perp = f(\Phi)$ в *n-Ge* для зразків першої групи

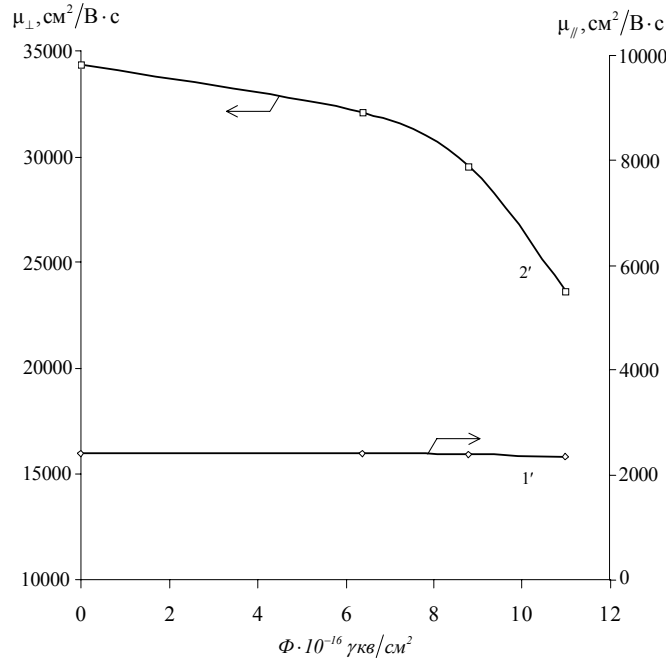


Рис. 2. Дозові залежності $\mu_{\parallel} = f(\Phi)$ та $\mu_{\perp} = f(\Phi)$ в $n-Ge$ для зразків другої групи

Вітчутніші зміни μ_{\perp} (рис. 1, крива 2) простежено для зразків першої групи, в яких вузькі області більш сильнішої компенсації розташовані перпендикулярно до напрямку струму і механічного напруження, що зумовлено збільшенням амплітуди ШПН унаслідок захоплення носіїв заряду із зони провідності на глибокі рівні радіаційних дефектів. Крім того, маса m_{\parallel} є “більш” інертна до різного роду змін у кристалі, а тому і $\langle \tau_{\parallel} \rangle$ практично не змінюється [3], що впливає із

$$\mu_{\parallel} = \frac{e}{m_{\parallel}} \langle \tau_{\parallel} \rangle. \quad (9)$$

Відповідно, m_{\perp} у 19,3 раза менша за m_{\parallel} . Це свідчить про те, що перпендикулярна складова m_{\perp} більш чутлива до різного роду впливів. Згідно зі співвідношенням

$$\mu_{\perp} = \frac{e}{m_{\perp}} \langle \tau_{\perp} \rangle \quad (10)$$

час релаксації $\langle \tau_{\perp} \rangle$, який описує релаксацію імпульсу для m_{\perp} , змінюватиметься відчутніше, ніж $\langle \tau_{\parallel} \rangle$, що підтверджується експериментально. Варто зазначити, що спостережувана анізотропія рухливості для $n-Ge$ узгоджується з результатами теоретичних і експериментальних праць, зокрема [6].

Отже, наявність радіації і ШПН суттєво впливає на анізотропні параметри в кристалах $n-Ge$.

Наявність періодичного розподілу домішки в напівпровідникових кристалах під час дослідження явищ переносу призводить до прояву (за певних умов) низки специфічних ефектів. Спрямоване створення неоднорідностей в об'ємі кристала дає змогу створення зразків з новими властивостями, наприклад, із заданим ступенем анізотропії рухливості та ін. [6]. Під час дослідження можливостей керування впливом ШПН на електрофізичні ефекти в опромінених зразках $n-Ge$, зокрема дією освітлення різної інтенсивності, було виявлено зміну параметра анізотропії рухливості $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$ [7].

Для дослідження анізотропії рухливості на зливках $n-Ge$ також було використано метод поздовжнього p' езоопору та p' езо-холл-ефекту. Аналогічно вирізались дві групи зразків паралельно осі росту кристала в кристалографічному напрямі [111] і під кутом 70° , але також в напрямі [111], відповідно. Вимірювання за вище згадуваною методикою проводились на вихідних зразках $n-Ge$ ($\rho_{300K} = 42 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) і на опромінених ^{60}Co дозою $1,1\cdot 10^{17} \text{ гкв/см}^2$ при $T = 77K$. Підсвічування досліджуваних зразків здійснювалась через фільтри $CdSb$ для виключення міжзонних переходів. Експериментальні результати вимірювання поздовжнього p' езоопору та p' езо-холл-ефекту подані в табл. 2. Видно, що для різних груп зразків зі збільшенням інтенсивності підсвічування зростає параметр анізотропії рухливості K , який обчислюють за співвідношенням (6).

Таблиця 2

Основні характеристики досліджуваних кристалів $n-Ge$ при різних рівнях підсвічування

ρ_T/ρ_{II}	ρ_{∞}/ρ_0	ρ_0 , Ом·см	K	n , см^{-3} ($X=8000 \text{ кГ/см}^2$)
Зразки першої групи				
1	5,6	263	7,9	$2,34\cdot 10^{12}$
1,5	7,7	176	11,05	$2,65\cdot 10^{12}$
2	8,7	132	12,55	$3,25\cdot 10^{12}$
3	13,5	88	19,75	$3,38\cdot 10^{12}$
5	15,3	53	22,45	$5,02\cdot 10^{12}$
10	22,58	26	33,37	$6,87\cdot 10^{12}$
Зразки другої групи				
1	8	18	11,5	$2,1\cdot 10^{13}$
1,5	11,5	12	16,75	$2,25\cdot 10^{13}$
2	13	9	19	$2,4\cdot 10^{13}$
3	14,5	6	21,25	$3,01\cdot 10^{13}$

Зазначимо, що для зразків першої групи зміна величин K , питомого опору кристала і концентрації носіїв заряду істотно відрізняється від зразків другої групи.

Це пояснюється різким збільшенням амплітуди ШПН в першій групі зразків, де напрям струму та механічного напруження ($J \parallel X$) перпендикулярний до шарів росту кристала [8].

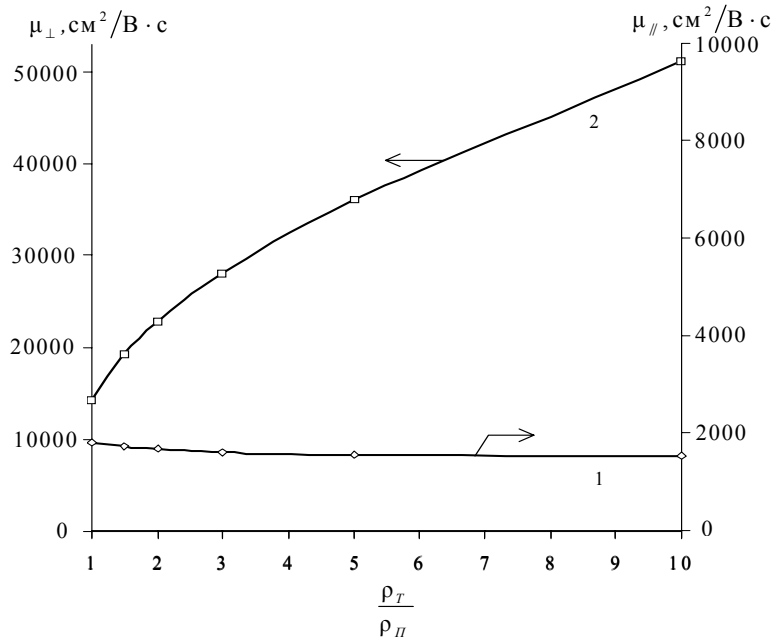


Рис. 3. Залежності $\mu_{\parallel} = f\left(\frac{\rho_T}{\rho_{\parallel}}\right)$ та $\mu_{\perp} = f\left(\frac{\rho_T}{\rho_{\parallel}}\right)$ при $T = 77\text{K}$ в $n\text{-Ge}$ для зразків першої групи

Користуючись рівняннями (7) та (8) і даними табл. 2 обчислені компоненти рухливості μ_{\parallel} та μ_{\perp} в ізоенергетичних еліпсоїдах. На рис. 3 і рис. 4 зображено залежності компонент рухливості μ_{\parallel} (криві 1 та 1') та μ_{\perp} (криві 2 та 2') від рівня підсвічування ρ_T/ρ_{\parallel} , де ρ_T і ρ_{\parallel} значення питомого опору в темряві і при підсвічуванні, відповідно, для зразків по-різному орієнтованих до шарів росту кристала $n\text{-Ge}$. На залежностях $\mu_{\parallel} = f\left(\frac{\rho_T}{\rho_{\parallel}}\right)$ (криві 1 та 1') для двох груп зразків спостерігається майже незмінність компоненти рухливості μ_{\parallel} від впливу освітлення. Щодо компоненти рухливості μ_{\perp} (рис. 3 і рис. 4, криві 2 та 2'), то вона має здатність різко зростати зі збільшенням інтенсивності освітлення для різних орієнтацій напрямку струму і механічного напруження відносно шарів росту кристала. Із встановленої тут незалежності μ_{\parallel} від інтенсивності освітлення (при $K_m = m_{\parallel}/m_{\perp} = \text{const}$) можна зробити висновок, що одержане зростання μ_{\perp}

при підвищенні інтенсивності освітлення визначається спадом параметра анізотропії часів релаксації K_τ , тому що $\mu_\perp K_\tau = \mu_\parallel K_m = \text{const}$.

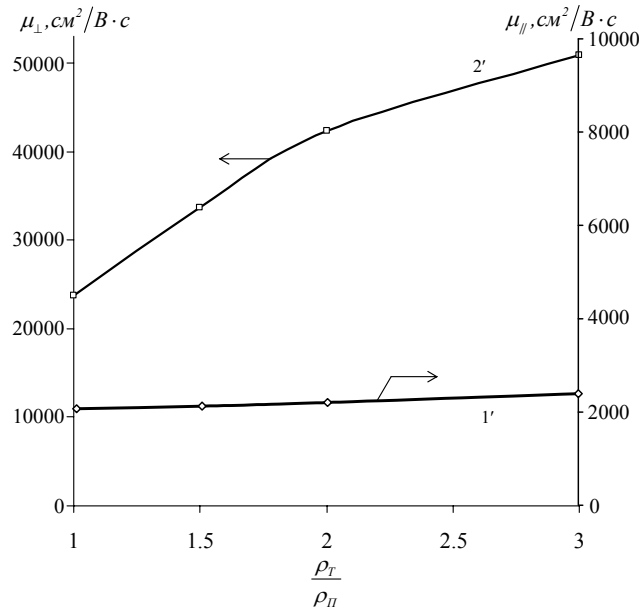


Рис. 4. Залежності $\mu_\parallel = f\left(\frac{\rho_L}{\rho_T}\right)$ та $\mu_\perp = f\left(\frac{\rho_L}{\rho_T}\right)$ при $T = 77\text{K}$ в $n\text{-Ge}$ для зразків другої групи

Отже, на підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що різні фізико-активні впливи, такі як радіація, світло, зумовлюють анізотропію електрофізичних величин в кристалах $n\text{-Ge}$ із шаруватим розподілом домішки. Вивчення цих особливостей створить передумови для врахування відзначених ефектів, а також забезпечить реальні шляхи мінімізації їх проявів там, де вони можуть виявитися небажаними.

1. Баранский П.И., Буда И.С., Даховский И.В., Коломоец В.В. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках. К.: Наук. думка, 1977. 269 с.
2. Баранський П.І., Венгер С.Ф., Гайдар Г.П. З'ясування причини зниження параметра анізотропії $K = \mu_\perp/\mu_\parallel$ в $n\text{-Ge}$ при підвищенні внеску домішкового розсіяння // Доповіді Національної академії наук України. 1999. № 9. С. 84–86.
3. Винецкий В.Л., Кухтарев Н.В., Семенюк А.К. Анизотропия электропроводности полупроводников, обусловленная периодическим распределением легирующей примеси // ФТП. 1972. Т. 6. № 6. С. 1007–1014.
4. Федосов А.В., Яцинский Л.В., Федосов С.А., Захарчук Д.А., Хвищун М.В. Влияние слоистых периодических неоднородностей на пьезосопротивление γ -облученных монокристаллов $n\text{-Si}$ и $n\text{-Ge}$ // Материалы Международной

- конференции “Физика электронных материалов”. Калуга, Россия: Калужский государственный педагогический университет им. К.Э. Циолковского, 2002. С. 148–149.
5. Федосов А.В., Захарчук Д.А., Федосов С.А., Яциньский Л.В. Особливості п’єзоопору γ -опромінених монокристалів n -Ge та n -Si при освітленні // Тези доповідей 1-ої Української наукової конференції з фізики напівпровідників УНКФН-1 (з міжнародною участю). Одеса, 2002. 87 с.
 6. Самойлович А.Г., Буда И.С., Даховский М.В. Теория анизотропного рассеяния // ФТП. 1973. Т. 7. № 4. 859 с.
 7. Семенюк А., Коровицький А. Тензоефекти в n -кремнії з ізовалентною домішкою германію // Науковий вісник ВДУ. Фізичні науки. Луцьк: Волин. держ. ун-т ім. Лесі Українки, 1999. № 14. С. 119–124.
 8. Dresselhaus G., Kip A., Kittel C. Cyclotron Resonance of Electrons and Holes in Silicon and Germanium Crystals // Phys. Rev. 1955. Vol. 98. P. 368.

**CHANGE OF PARAMETER OF MOBILITY ANISOTROPY IN n -Ge
DEPENDING ON DOSE OF γ -IRRADIATION AND ILLUMINATION**

D. Zakhartchuk

*The State Technical University of Lutsk,
Lvivs'ka Str., 75, UA-43018 Lutsk, Ukraine
e-mail: zachdim@mail.ru*

Making an use methods of longitudinal piezoresistance and piezo-hall-effect it is explored dependence of change of parameter of anisotropy of mobility and absolute values mobility component in the longitudinal ($\mu_{||}$) and transversal (μ_{\perp}) directions in regard to the main axis of isoenergy ellipsoid depending on dose of γ -irradiation and illumination level in mono crystals n -Ge. It is exposed, that component mobility does not practically rely on dose of γ -irradiation and level of illumination for standards, that cut out parallel and athwart in regard to the crystal growth axis, on abolition from. The more perceptible changes exist for standards, in which narrow fields of proponent compensation located athwart to direction of current and mechanical tension, that conditioned by the increase of amplitude of stratified periodic heterogeneities as a result of seizure of charge transmitters from the conductivity area on the deep levels of radiation defects.

Key words: piezoresistance, germanium, isoenergy ellipsoid, mobility.

Стаття надійшла до редколегії 19.05.2004
Прийнята до друку 21.11.2005