

УДК 621.315.592

С. А. Федосов – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики твердого тіла Волинського національного університету імені Лесі Українки;
С. В. Луньов – асистент кафедри фізики Луцького національного технічного університету;
Д. А. Захарчук – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Луцького національного технічного університету;
Л. І. Панасюк – кандидат фізико-математичних наук, докторант кафедри фізики Луцького національного технічного університету;
Ю. В. Коваль – кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри фізики Луцького національного технічного університету

Вплив одновісної пружної деформації на положення та ступінь заповнення глибокого рівня $E_C - 0,2$ еВ у монокристалах n-Ge<Au>

Роботу виконано на кафедрі фізики ЛНТУ та кафедрі фізики твердого тіла ВНУ ім. Лесі Українки

Досліджено вплив одновісної пружної деформації на величину зміни положення глибокого енергетичного рівня золота $E_C - 0,2$ еВ в n-Ge за даними п'єзоопору у широкій області механічних напруг $X = 0-1,2$ ГПа для $X \parallel J \parallel [110]$ та $X \parallel J \parallel [100]$. Представлено метод розрахунку швидкості зміщення глибоких рівнів і оцінено ступінь їх заповнення α при одновісній деформації. Обчислено величину зміни енергетичної щільності між глибоким енергетичним рівнем $E_C - 0,2$ еВ і долинами зони провідності n-Ge<Au> при деформації вздовж кристаллографічних напрямків $[110]$ і $[100]$. Визначено середнє значення коефіцієнта α (ступінь заповнення глибоких енергетичних рівнів) для різних температур.

Ключові слова: п'єзоопір, енергетична щільність, глибокий рівень, одновісна пружна деформація, кристаллографічний напрямок.

Федосов С. А., Лунёв С. В., Захарчук Д. А., Панасюк Л. И., Коваль Ю. В. Влияние одноосной упругой деформации на положение и степень заполнения глубокого уровня $E_C - 0,2$ эВ в монокристаллах n-Ge<Au>. Исследовано влияние одноосной упругой деформации на величину изменения глубокого уровня золота $E_C - 0,2$ эВ в n-Ge за данными пьезосопротивления в широком диапазоне механических напряжений $X = 0-1,2$ ГПа для $X \parallel J \parallel [110]$ и $X \parallel J \parallel [100]$. Представлен метод расчета скорости смещения глубоких уровней и оценена степень их заполнения α при одноосной деформации. Вычислена величина изменения энергетического зазора между глубоким энергетическим уровнем $E_C - 0,2$ эВ и долинами зоны проводимости n-Ge<Au> при деформации вдоль кристаллографических направлений $[110]$ и $[100]$. Определено среднее значение коэффициента α (степень заполнения глубоких энергетических уровней) для разных температур.

Ключевые слова: пьезосопротивление, энергетический зазор, глубокий уровень, одноосная упругая деформация, кристаллографическое направление.

Fedosov S. A., Luniov S. V., Zakharchuk D. A., Panasyuk L. I., Koval Y. V. Influence of Uniaxial Elastic Deformation on the Location of Deep Energy Levels $E_C - 0,2$ eV in n-Ge<Au> Single Crystals. The influence of uniaxial elastic deformation on the change of the location of deep energy level of gold $E_C - 0,2$ eV in n-Ge according to piezoresistance in wide area of mechanical stress $X = 0-1,2$ GPa is investigated under a condition $X \parallel J \parallel [110]$ and $X \parallel J \parallel [100]$. The method of calculation of shift rate is represented and the state of filling of the energy levels (α) to an uniaxial deformation is estimated. A change of the energy gap between the deep energy level $E_C - 0,2$ eV and the conduction band valleys in n-Ge<Au> arising due to deformation along the crystallographic directions $[110]$ and $[100]$ is calculated. The value average of an α at different temperatures was determined.

Key words: piezoresistance, energy gap, deep level, uniaxial elastic deformation, crystallographic direction.

Постановка наукової проблеми та її значення. Вивчення поведінки глибоких центрів при деформації містить важливі відомості про характер зв'язку локальних електронних станів цих центрів із найближчими зонами, вказує на тип симетрії дефекту, ступінь деформації внутрішніх зв'язків у ґратці, тому питання, пов'язані з структурою та енергетичним спектром центрів сильної локалізації електронів є актуальними як в практичному плані, так і в пізнавальному відношенні [8].

У праці [11] першочергово досліджено вплив глибокого рівня золота $E_C - 0,2$ еВ на п'єзоопір n-Ge. Поведінку глибоких рівнів при деформації не можна проаналізувати, як поведінку мілких рівнів. Мілкі рівні практично не зміщуються при деформації відносно країв зон, а глибокі – зміщені з великою швидкістю, причому кожен з таких рівнів характеризується швидкістю зміщення [9]. Використання одних лише залежностей п'єзоопору, навіть в області сильних одновісних пружних деформацій не завжди приводить до правильних результатів щодо зміни положення глибокого рівня [10]. Похибки зумовлено залежністю ефективної рухливості від ступеня однорідності кристалів і одновісного тиску. Оскільки характер і величина зміщення рівня з тиском недостатньо залежать від температури [6], то лише правильне врахування числового коефіцієнта α дозволяє коректно визначити значення величини зміни енергетичної щільності при різних фіксованих температурах.

Мета статті – дослідити величину зміни енергетичної щільності між глибоким рівнем золота $E_C - 0,2$ еВ і дном зони провідності n-Ge та встановити залежність ступеня заповнення цього рівня від температури і тиску в деформованому напівпровіднику. **Завдання** – представити метод розрахунку ступеня заповнення глибокого рівня від температури і тиску та визначити для різних кристалографічних напрямків величину зміни енергетичної щільності між глибоким рівнем $E_C - 0,2$ еВ і дном зони провідності n-Ge.

Матеріали і методи. Досліджено монокристали n-Ge з вихідною концентрацією носіїв струму $n = 3 \times 10^{14}$ см⁻³ та глибоким енергетичним рівнем $E_C - 0,2$ еВ, який утворюється внаслідок легування германію домішкою золота (у процесі вирощування). Зразки для вимірювань вирізались вздовж кристалографічних напрямків [110] і [100]. В інтервалі механічних напруг $X = 0-1,2$ ГПа досліджено вплив одновісної пружної деформації на величину зміни положення глибокого енергетичного рівня золота $E_C - 0,2$ еВ в n-Ge.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. У монокристалах n-Ge без глибоких рівнів наявність п'єзоопору для кристалографічного напрямку [110] обумовлена переселенням носіїв струму з двох долин з більшою рухливістю (що піднімаються вгору за шкалою енергії) у дві долини, що опускається і має меншу рухливість. Це приводить до зростання п'єзоопору з подальшим виходом на насичення [13]. У випадку ж n-Ge з глибоким енергетичним рівнем $E_C - 0,2$ еВ золота з'являється тенденція до зменшення питомого опору зі збільшенням тиску при переході через максимум залежності $\rho = \rho(X)$ для випадку $X \parallel J \parallel [110]$ (рис. 1). Ці результати можуть пояснено двома причинами зміни питомого опору з тиском: деформаційним перерозподілом носіїв струму між долинами, що веде до зростання $\rho(X)$ та збільшення загальної концентрації носіїв струму в С-зоні за рахунок зменшення величини енергетичної щільності між глибоким рівнем і дном зони провідності, внаслідок чого питомий опір $\rho(X)$ зменшено.

Для випадку $X \parallel J \parallel [100]$, відносне зміщення долин зони провідності n-Ge відсутнє, а тому без наявності глибоких рівнів у цих кристалах їх питомий опір (при $T \approx 77 \div 200$ К) не залежить від механічної напруги X аж до значень 10000–15000 кГ/см² (1,0–1,5 ГПа) [5]. П'єзоопір у цьому випадку зумовлений лише дією другого механізму: зменшенням величини енергетичної щільності між глибоким рівнем золота і нижніми долинами зони провідності n-Ge (рис. 2).

Нехай E_ε – енергетичне положення глибокого рівня при деформації ε , а E_0 – енергетичне положення цього рівня при відсутності деформації, то [9]:

$$E_\varepsilon = E_0 + \Delta E,$$

де ΔE – зміна величини енергетичної щільності між глибоким енергетичним рівнем і дном зони провідності.

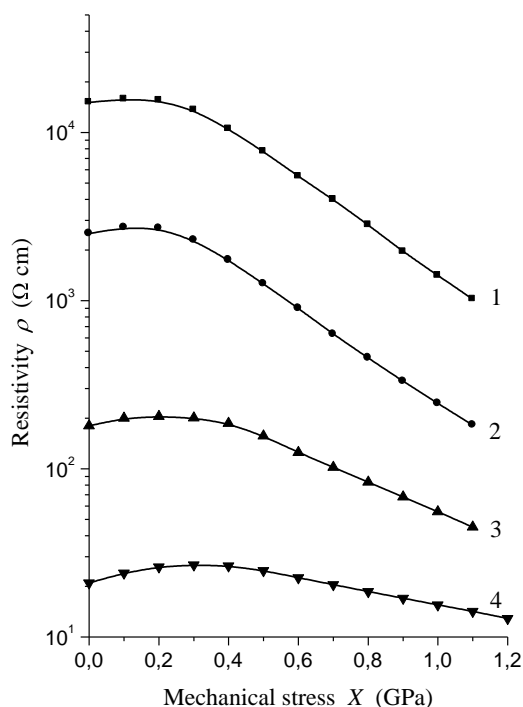


Рис. 1. Залежності поздовжнього n' езоопору $\rho = f(X)$ $n\text{-Ge}\langle\text{Au}\rangle$ для випадку $X \parallel J \parallel [110]$ при різних температурах T , К: 1 – 110; 2 – 125; 3 – 150; 4 – 190

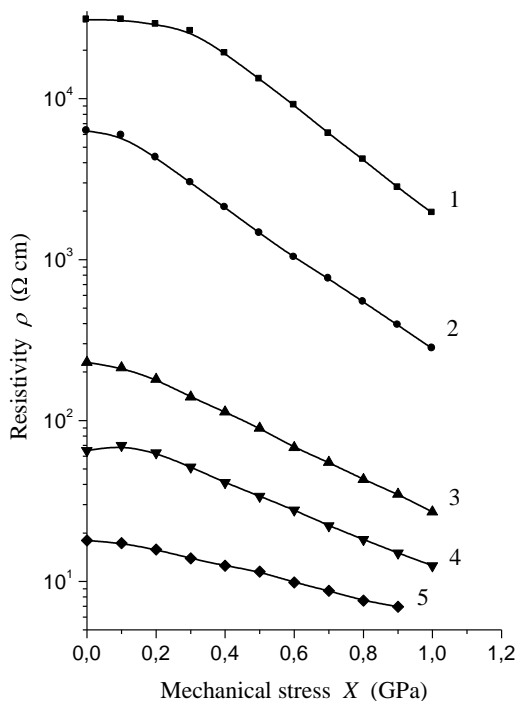


Рис. 2. Залежності поздовжнього n' езоопору $\rho = f(X)$ $n\text{-Ge}\langle\text{Au}\rangle$ для випадку $X \parallel J \parallel [100]$ при різних температурах T , К: 1 – 100; 2 – 120; 3 – 150; 4 – 160; 5 – 200

Якщо концентрація електронів у зоні провідності [12]:

$$n = A \exp\left(-\frac{E_0}{\alpha kT}\right),$$

а її значення у деформованому напівпровіднику:

$$n_\varepsilon = A \exp\left(-\frac{E_\varepsilon}{\alpha kT}\right),$$

то залежність концентрації електронів у зоні провідності від деформації має вигляд [9]:

$$n_\varepsilon = n \exp\left(-\frac{\Delta E}{\alpha kT}\right). \quad (1)$$

У результаті диференціювання (1) по X , отримано:

$$\frac{dn_\varepsilon}{dX} = -\frac{n}{\alpha kT} e^{-\frac{\Delta E}{\alpha kT}} \times \frac{d(\Delta E)}{dX}, \quad (2)$$

де згідно з працями [1–3; 6; 12]:

$$\frac{d(\Delta E)}{dX} = const, \quad (3)$$

а величина $\frac{dn_\varepsilon}{dX}$ для довільного значення X_1 рівна тангенсу кута нахилу дотичної до графіка функції $n_\varepsilon = f(X)$:

$$\left.\frac{dn_\varepsilon}{dX}\right|_{X_1} = tg\beta_1. \quad (4)$$

Зіставляючи (1), (2) і (4), отримано:

$$\frac{d(\Delta E)}{dX} = -\frac{\alpha_1 kT}{n_\varepsilon(X_1)} tg\beta_1. \quad (5)$$

Отже, враховуючи (3), для двох різних значень X_1 і X_2 :

$$\frac{\alpha_1 tg\beta_1}{n_\varepsilon(X_1)} = \frac{\alpha_2 tg\beta_2}{n_\varepsilon(X_2)}. \quad (6)$$

У дослідженнях [4; 7] зазначено, що залежність концентрації при температурах $T > T_x$ (T_x – деяка характеристична температура, значення якої визначається експериментально з температурної залежності концентрації носіїв струму) описується $n \propto \exp\left(-\frac{E_0}{2kT}\right)$. У випадку температур $T \leq T_x$ під знак експоненти входить повна енергія активації рівня $-\alpha=1$. За результатами холлівських вимірювань для n-Ge з глибоким енергетичним рівнем золота $E_C - 0,2$ еВ [4] $T_x = 155$ К, а відповідна їй концентрація $n(T_x) \cong 3 \times 10^{13}$ см⁻³. На основі (6) одержано:

$$\frac{\alpha_1 tg\beta_1}{n_\varepsilon(X_1)} = \frac{tg\beta_0}{n_\varepsilon(X_0)}, \quad (7)$$

де $tg\beta_0$ – тангенс кута нахилу дотичної до залежності $n_\varepsilon = f(X)$ у точці X_0 , в якій $n_\varepsilon(X_0) = n(T_x)$.

Із (7) значення коефіцієнта α , при $X = X_1$:

$$\alpha_1 = \frac{n_\varepsilon(X_1) \cdot tg\beta_0}{n_\varepsilon(X_0) \cdot tg\beta_1}, \quad (8)$$

а в загальному випадку для довільних значень механічної напруги $X = X_n$:

$$\alpha_n = \begin{cases} \frac{n_\varepsilon(X_n) \cdot tg\beta_0}{n_\varepsilon(X_0) \cdot tg\beta_n}, & \text{коли } X_n \neq X_0 \\ 1, & \text{коли } X_n = X_0 \end{cases}. \quad (9)$$

Якщо ж $T_2 > T_x$ ($T_2 = const$), згідно (3) і (5),

$$\alpha_n = \frac{T_1 n_\varepsilon(X_n, T_2) \operatorname{tg} \beta_0}{T_2 n_\varepsilon(X_0, T_1) \operatorname{tg} \beta_n}. \quad (10)$$

Значення величини зміни енергетичної щільності між глибоким рівнем E_ε і долинами зони провідності при деформації ($T = \text{const}$), згідно (5) і (7), дорівнює:

$$\frac{d(\Delta E)}{dX} = - \frac{kT}{n_\varepsilon(X_0)} \operatorname{tg} \beta_0. \quad (11)$$

Величина зміни енергетичної щільності між глибоким рівнем і дном зони провідності має вигляд:

$$\Delta E = \frac{d(\Delta E)}{dX} X. \quad (12)$$

Враховуючи, згідно з [11], що

$$\frac{d(\Delta E)}{dX} = \frac{2,3(\Delta \lg \rho) \cdot \alpha k T}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \Delta X},$$

та формулу (12), вираз (1) для обчислення концентрації електронів n_ε у деформованому напівпровіднику при наявності глибоких енергетичних рівнів набуває вигляду:

$$n_\varepsilon = n \left(\frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \right)^{\frac{X}{\Delta X}}, \quad (13)$$

де ρ_i та ρ_{i+1} – значення питомого опору, яке відповідає механічній напрузі X_i та X_{i+1} відповідно; X_i та $X_{i+1} > X'$ (X' – механічна напруга, при якій залежність $\rho = f(X)$ має максимум).

На рисунку 3 та рисунку 4 подано залежності $n_\varepsilon = f(X)$ концентрації носіїв струму від механічної напруги для різних кристалографічних напрямків і різних температур. Значення n_ε розраховане за даними п'єзоопору, згідно (13). Величину зміни енергетичної щільності між глибоким рівнем $E_C - 0,2$ еВ і дном зони провідності n-Ge визначено для різних кристалографічних напрямків за вищевказаним методом. Вона становить:

$$X \parallel J \parallel [110] - (3,1 \pm 0,1) \times 10^{-3} \text{ еВ};$$

$$X \parallel J \parallel [100] - (2,8 \pm 0,1) \times 10^{-3} \text{ еВ (у розрахунку на кожні 0,1 ГПа тиску)}.$$

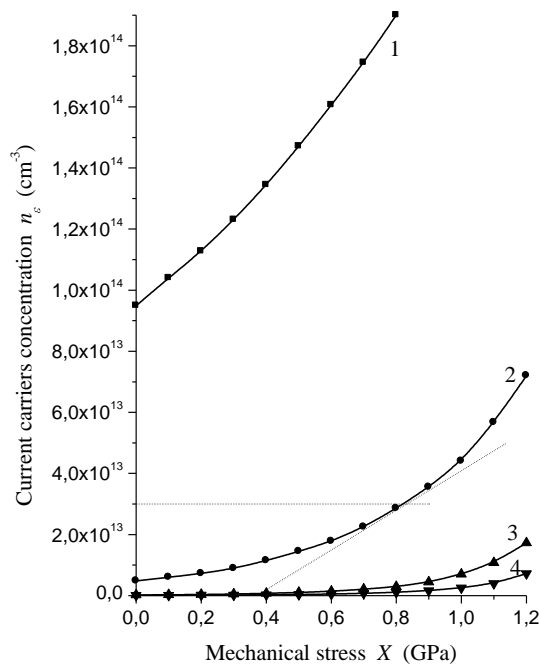


Рис. 3. Залежності концентрації носіїв струму від механічної напруги в $n\text{-Ge}\langle\text{Au}\rangle$ для випадку $X \parallel J \parallel [110]$ при різних температурах T, K : 1 – 190; 2 – 150; 3 – 125; 4 – 110

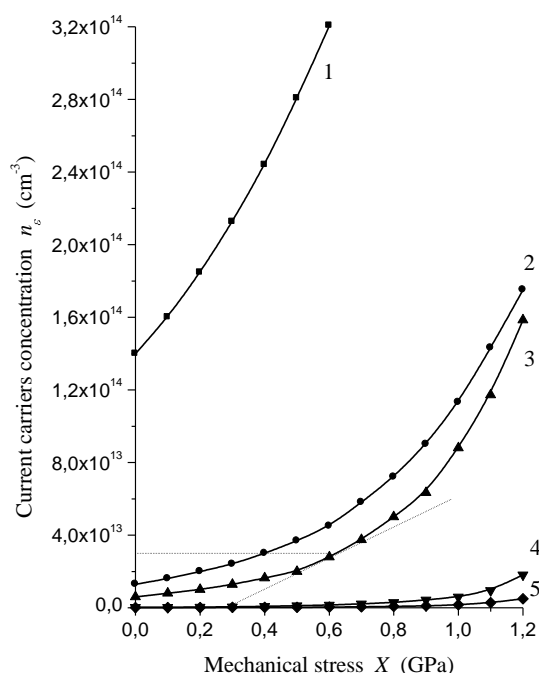


Рис. 4. Залежності концентрації носіїв струму від механічної напруги в $n\text{-Ge}\langle\text{Au}\rangle$ для випадку $X \parallel J \parallel [100]$ при різних температурах T, K : 1 – 200; 2 – 160; 3 – 150; 4 – 120; 5 – 100

Середні значення коефіцієнтів α , визначені згідно з (9) та (10), для головних кристалографічних напрямків при різних значеннях температури T в одновісно деформованому $n\text{-Ge}$ з домішкою золота, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Середні значення коефіцієнтів α для різних кристалографічних напрямків і температур для одновісно деформованого $n\text{-Ge}$ з домішкою золота

T, K	100	110	120	125	150	160	190	200
$\alpha [110]$	–	1,09	–	1,19	1,51	–	1,79	–
$\alpha [100]$	1,04	–	1,07	–	1,42	1,54	–	1,95

Висновки. Результати дослідження свідчать, що для обстежуваних кристалографічних напрямків в $n\text{-Ge}\langle\text{Au}\rangle$ енергетична щілина між глибоким рівнем золота і дном S -зони при збільшенні механічної напруги зменшується і лінійно залежить від X . Баричний коефіцієнт зміни енергетичної щілини для напрямків $[110]$ і $[100]$ приблизно однаковий.

За розрахунками середнє значення коефіцієнта α із зростанням температури збільшується для досліджуваних кристалографічних напрямків, що свідчить про зменшення ступеня заповнення глибокого рівня золота в $n\text{-Ge}$. При невеликих значеннях механічної напруги, коли ще можливий міждолинний перерозподіл, глибокий рівень $E_C - 0,2 \text{ eV}$ буде обмінюватись носіями струму з чотирма долинами зони провідності $n\text{-Ge}$, а при сильних одновісних деформаціях – з тими долинами, які виявились нижніми при деформації. Тому коефіцієнт α значно залежить від одновісного тиску для кристалографічного напрямку $[110]$, якщо можливий міждолинний перерозподіл, і недостатньо залежить від X для кристалографічного напрямку $[100]$, коли міждолинний перерозподіл відсутній.

Список використаної літератури

1. Баранський П. І. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу / П. І. Баранський, А. В. Федосов, Г. П. Гайдар. – Луцьк : Надстир'я, 2000. – 280 с.

2. Визначення швидкості зміщення глибоких енергетичних рівнів в монокристалах кремнію при одновісній пружній деформації / А. В. Федосов та ін. // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. – 2008. – № 18. – С. 54–58.
3. Вплив глибоких енергетичних рівнів на тензоефекти у кристалах n-Ge<Au> / А. В. Федосов та ін. // Наук. нотатки : міжвуз. зб. за напрямом «Інженерна механіка». Ч. 2. – Луцьк : РВВ Луцьк. нац. техн. ун-ту, 2009. – № 25. – С. 301–303.
4. Семенюк А. К. Радіаційні ефекти в багатодолинних напівпровідниках / А. К. Семенюк. – Луцьк : Надтир'я, 2001. – 323 с.
5. Баранский П. И. Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в n-Ge / П. И. Баранский, В. В. Коломеец, А. В. Федосов // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10, № 11. – С. 2179–2181.
6. Бир Г. Л. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках / Г. Л. Бир, Г. Е. Пикус. – М. : Наука, 1972. – 584 с.
7. Зеегер К. Физика полупроводников / К. Зеегер. – М., 1977. – 615 с.
8. Конозенко И. Д. Радиационные эффекты в кремнии / И. Д. Конозенко, А. К. Семенюк, В. И. Хиврич. – К. : Наук. думка, 1974. – 200 с.
9. Полякова А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / А. Л. Полякова. – М. : Наука, 1979. – 168 с.
10. Семенюк А. К. Влияние одноосных деформаций на положение глубокого уровня золота в n-Ge / А. К. Семенюк, П. Ф. Назарчук // Физика и техника полупроводников. – 1984. – Т. 18, № 3. – С. 540–542.
11. Семенюк А. К. Пьезосопротивление n-Ge при наличии глубоких уровней / А. К. Семенюк, А. В. Федосов // Физика и техника полупроводников. – 1979. – Т. 13, № 5. – С. 1001–1003.
12. Федосов А. В. Кинетические эффекты в многодолинных полупроводниках (n-Si и n-Ge) при одноосной упругой деформации : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : спец. 01.04.10 «Физика полупроводников и диэлектриков» / А. В. Федосов. – Киев, 1992. – 191 с.
13. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках / П. И. Баранский и др. – Киев : Наук. думка, 1977. – 269 с.

Статтю подано до редколегії
20.05.2011 р.