

УДК 621.315.592

ВПЛИВ ОДНОВІСНОЇ ПРУЖНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА РУХЛИВІСТЬ НОСІЇВ СТРУМУ В КРИСТАЛАХ $n-Si$ ТА $n-Ge$ ПРИ НАЯВНОСТІ ГЛИБОКИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РІВНІВ

С. В. Луньов

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська 75, Луцьк, 43018, Україна,
тел.:8(0332)6-66-15, e-mail: luniovser@mail.ru

ВПЛИВ ОДНОВІСНОЇ ПРУЖНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА РУХЛИВІСТЬ НОСІЇВ СТРУМУ В КРИСТАЛАХ $n-Si$ ТА $n-Ge$ ПРИ НАЯВНОСТІ ГЛИБОКИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РІВНІВ

С. В. Луньов

Анотація. Досліджено вплив одновісної пружної деформації на зміну рухливості носіїв струму в кристалах $n-Si$ з глибоким енергетичним рівнем $E_c - 0,17$ eV та $n-Ge$ з глибоким енергетичним рівнем $E_c - 0,2$ eV. Показано, що при даній концентрації глибоких центрів в кристалах $n-Si$ та $n-Ge$ особливості залежностей $\frac{\mu}{\mu_0} = f(X)$ при різних температурах ті ж, що і у відносно чистих кристалах $n-Si$ та $n-Ge$ без глибоких рівнів в умовах переважно фононного розсіяння.

Ключові слова: деформація, рухливість, глибокий рівень, фононне розсіяння

INFLUENCE OF UNIAXIAL ELASTIC DEFORMATION ON MOBILITY OF CARRIERS OF THE CURRENT IN CRYSTALS $n-Si$ AND $n-Ge$ IN THE PRESENCE OF DEEP ENERGETIC LEVELS

S. V. Luniov

Abstract. An influence of uniaxial elastic deformation on change of mobility of carriers of a current in crystals $n-Si$ with a deep level $E_c - 0,17$ eV and $n-Ge$ with a deep energetic level $E_c - 0,2$ eV is investigated. During this concentration of deep centers in crystals $n-Si$ and $n-Ge$ features of dependences $\frac{\mu}{\mu_0} = f(X)$ at different temperatures those, that and in relation to clean crystals $n-Si$ and $n-Ge$ without deep levels in the conditions of mainly phonon dissipation is showed.

Keywords: deformation, mobility, deep level, phonon dissipation

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОЙ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В КРИСТАЛЛАХ $n-Si$ ТА $n-Ge$ ПРИ НАЛИЧИИ ГЛУБОКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

С. В. Лунёв

Аннотация. Исследовано влияние одноосной упругой деформации на изменение подвижности носителей тока в кристаллах $n-Si$ с глибоким энергетическим уровнем $E_c - 0,17$ eV та $n-Ge$ с глибоким энергетическим уровнем $E_c - 0,2$ eV. Показано, что при данной концентрации глибоких центров в кристаллах $n-Si$ та $n-Ge$ особенности зависимостей $\frac{\mu}{\mu_0} = f(X)$ при разных температурах те же, что и в относительно чистых кристаллах $n-Si$ та $n-Ge$ без глибоких уровней в условиях преимущественно фононного рассеяния.

Ключевые слова: деформация, подвижность, глибокий уровень, фононное рассеяния

Вивчення основних закономірностей тензо-ефектів в багатодолинних напівпровідниках з глибокими енергетичними рівнями технологічного і радіаційного походження є актуальним в теоретичному, так і в прикладному аспектах. В прикладному відношенні роль глибоких рівнів важлива при використанні електричних, рекомбінаційних, оптичних, резонансних та інших фізичних властивостей напівпровідників.

Дослідженню впливу одновісної пружної деформації на зміну рухливості носіїв струму в напівпровідниках присвячено ряд робіт [1-3], але в літературі є мало відомостей про особливості залежності рухливості від механічного тиску при наявності глибоких енергетичних рівнів в забороненій зоні напівпровідника, що і стало стимулом для написання даної роботи.

Запишемо вираз для питомої електропровідності напівпровідника n-типу провідності:

$$\sigma = en\mu, \quad (1)$$

або

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (2)$$

де ρ — питомий опір напівпровідника.

При деформації напівпровідника питома електропровідність буде функцією механічної напруги X .

Продиференціюємо (1) по X :

$$\frac{d\sigma}{dX} = e\left(\mu \frac{dn}{dX} + n \frac{d\mu}{dX}\right). \quad (3)$$

З врахуванням (2), (3) можна записати так:

$$-\frac{1}{\rho^2} \frac{d\rho}{dX} = e\left(\mu \frac{dn}{dX} + n \frac{d\mu}{dX}\right). \quad (4)$$

Концентрація електронів в деформованому напівпровіднику при наявності глибоких енергетичних рівнів визначається [4]:

$$n = n_0 e^{-\frac{\Delta E}{\alpha kT}}, \quad (5)$$

де ΔE — зміна величини енергетичної щільності між глибоким рівнем і дном зони провідності при деформації, α — коефіцієнт, який змінюється від 1 до 2 в залежності від ступеня заповнення глибокого рівня [3], n_0 — концентрація електронів в недеформованому напівпровіднику.

Продиференціюємо (5) по X :

$$\frac{dn}{dX} = -\frac{n_0}{\alpha kT} e^{-\frac{\Delta E}{\alpha kT}} \cdot \frac{d(\Delta E)}{dX}. \quad (6)$$

Враховуючи (1), (2), (5) і (6), (4) набуде вигляду:

$$-e^2 n^2 \mu^2 \frac{d\rho}{dX} = e\left(-\frac{n}{\alpha kT} \frac{d(\Delta E)}{dX} \mu + n \frac{d\mu}{dX}\right). \quad (7)$$

Після нескладних математичних розрахунків отримаємо:

$$\frac{d\mu}{dX} - a\mu = b\mu^2, \quad (8)$$

де через a і b ми позначили відповідно:

$$a = \frac{d(\Delta E)}{dX}, \quad b = -en \frac{d\rho}{dX}. \quad (9)$$

Диференціальне рівняння (8) є рівнянням Бернуллі, загальний розв'язок якого матиме вигляд:

$$\mu = \frac{e^{aX}}{en_0\rho + c}, \quad (10)$$

де c — стала інтегрування, значення якої можна визначити з початкових умов:

$$\mu(0, T_0) = \mu_0, \quad (11)$$

де μ_0 — рухливість електронів в недеформованому напівпровіднику при деякій фіксованій температурі T_0 .

З врахуванням (11), (10) набуде вигляду:

$$\mu = \frac{\mu_0 e^{aX}}{\mu_0 e[n_0\rho(X, T) - n_0(T_0)\rho(T_0)] + 1}. \quad (12)$$

В нашій роботі досліджувались кристали $n-Ge$ з вихідною концентрацією носіїв струму $n = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і глибоким енергетичним рівнем золота $E_c - 0,2 \text{ eV}$ та кристали $n-Si$ з вихідною концентрацією носіїв струму $n = 1,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і глибоким енергетичним рівнем $E_c - 0,17 \text{ eV}$. В $n-Ge$ глибокі рівні вводились легуванням кристалів германію домішкою золота (в процесі вирощування), а в $n-Si$ — опроміненням γ -квантами Co^{60} дозою $1,9 \cdot 10^{17} \frac{\text{кВ}}{\text{см}^2}$. Як відомо, переважаючим радіаційним дефектом в γ -опроміненому $n-Si$ з високим вмістом домішки кисню є глибокий енергетичний рівень $E_c - 0,17 \text{ eV}$, що належить А-центру (комплекс вакансії з міжвузловим атомом кисню) [5,6].

На рис. 1, 2 подано температурні залежності п'єзоопору γ -опроміненого $n-Si$ для випадку, коли $X // J // [100]$, і температурні за-

лежності п'езоопору $n-Ge$ з глибоким енергетичним рівнем золота $E_c - 0,2 eV$ в умовах $X // J // [111]$.

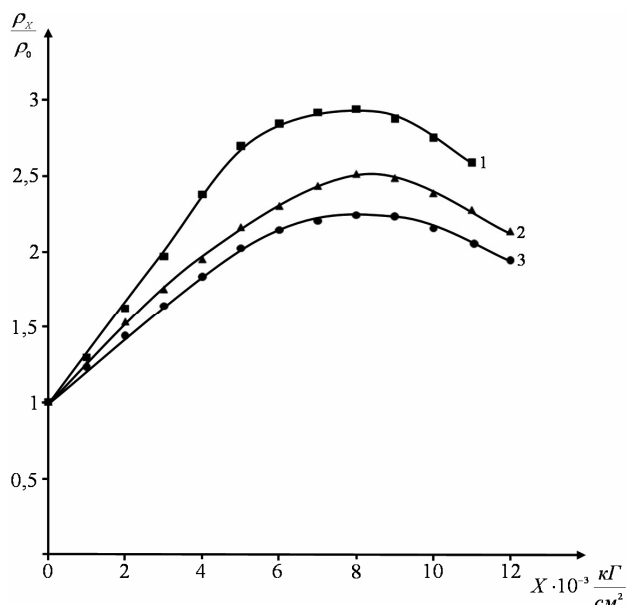


Рис 1. Залежності п'езоопору $\frac{\rho_x}{\rho_0} = f(X)$ γ -опроміненого $n-Si$ дозою $1,9 \cdot 10^{17} \frac{КВ.}{см^2}$ при умові, коли $X // J // [100]$, для різних температур T, K : 1-77; 2-110; 3-150

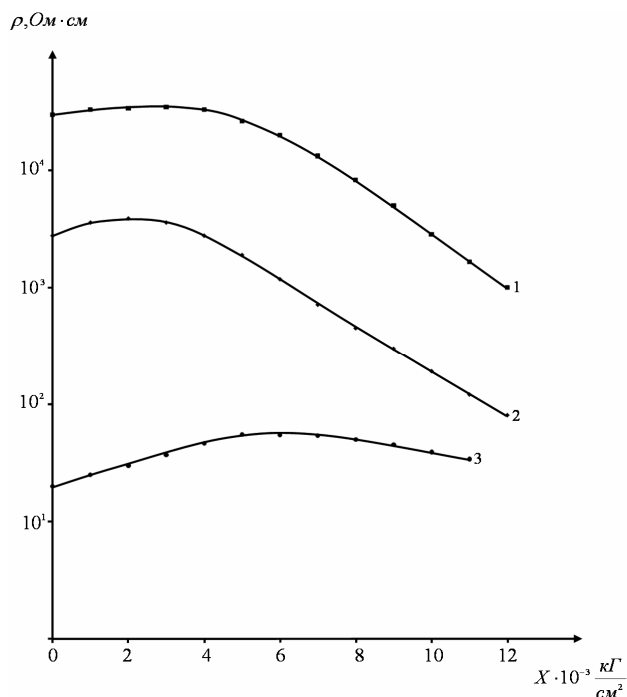


Рис 2. Залежності $\rho = f(X)$ для $n-Ge$ з домішкою золота при умові, коли $X // J // [111]$, для різних температур T, K : 1-100; 2-125; 3-190

За прямолінійним нахилом спаду кривих $\lg \rho = f(X)$ можна визначити величину зміни енергетичної щільності між глибоким рівнем і нижніми долинами зони провідності напівпровідника [3]:

$$\frac{d(\Delta E)}{dX} = \frac{2,3(\Delta \lg \rho) \cdot \alpha kT}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \Delta X}, \quad (13)$$

де α — коефіцієнт, який змінюється від 1 до 2 в залежності від ступеня заповнення глибокого рівня.

Тоді зміна рухливості електронів при деформації при певній фіксованій температурі T_0 , згідно з (12), враховуючи (13), матиме вигляд:

$$\mu = \mu_0 \frac{\left\langle \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \right\rangle^{\frac{X}{\Delta X}}}{\frac{\rho(T_0, X)}{\rho(T_0)}}, \quad (14)$$

де ρ_i та ρ_{i+1} — значення питомого опору, яке відповідає механічній напрузі X_i та X_{i+1} відповідно. $X_i, X_{i+1} > X_0$ (X_0 — механічна напруга, при якій залежність $\rho = f(X)$ має максимум).

Експериментальні результати, які опрацьовані по вище вказаному методу подані на рис. 3, 4.

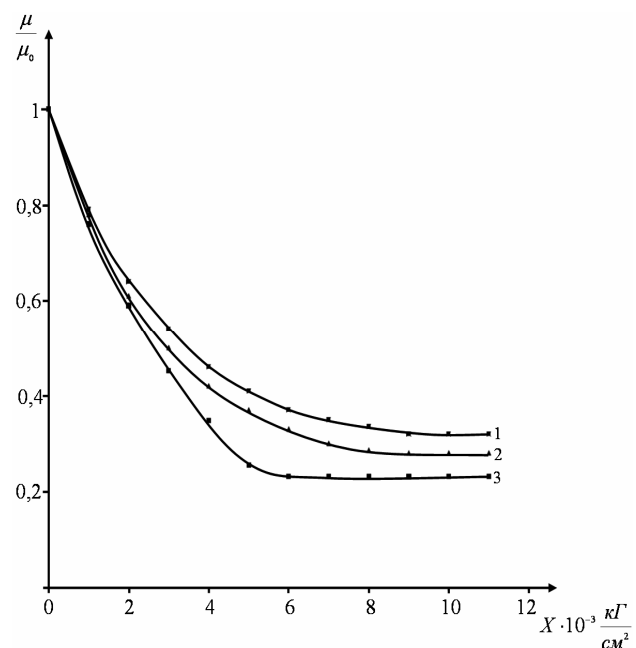


Рис 3. Залежності $\frac{\mu}{\mu_0} = f(X)$ γ -опроміненого $n-Si$ дозою $1,9 \cdot 10^{17} \frac{КВ.}{см^2}$ при умові, коли $X // J // [100]$, для різних температур T, K : 1-77; 2-110; 3-150

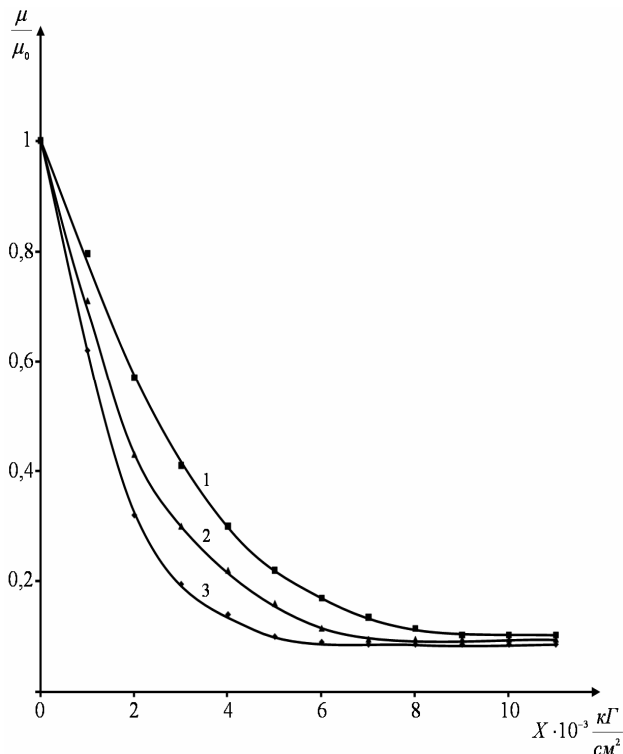


Рис. 4. Залежності $\frac{\mu}{\mu_0} = f(X)$ для $n-Ge$ з домішкою золота при умові, коли $X // J // [111]$, для різних температур T, K : 1-190 (■); 2-125 (▲); 3-100 (◆)

Як видно з рис.3, 4, залежності $\frac{\mu}{\mu_0} = f(X)$ при великих X виходять на насичення, що пояснюється повним переселенням носіїв струму з чотирьох долин, які піднімаються, у дві долини, що опускаються при деформації в $n-Si$, для випадку $X // J // [100]$, та повним переселенням носіїв струму з трьох долин, які піднімаються, в одну долину, що опускається при деформації в $n-Ge$, коли $X // J // [111]$. При цьому глибокий рівень $E_c - 0,17 eV$ в $n-Si$ буде обмінюватись носіями струму лише з двома долинами, а глибокий рівень $E_c - 0,2 eV$ в $n-Ge$ — з однією долиною. Ці долини і визначатимуть концентрацію і рухливість носіїв струму в $n-Si$ та $n-Ge$ при сильних одноосіньних деформаціях [6,7].

Згідно з рис. 4, залежності $\frac{\mu}{\mu_0} = f(X)$ для різних температур в $n-Ge$ з глибоким енергетичним рівнем золота $E_c - 0,2 eV$ характеризуються майже єдиним значенням плато $\frac{\mu_\infty}{\mu_0}$, на відмінну від $n-Si$ з глибоким енергетичним рівнем $E_c - 0,17 eV$ (рис.3), в якому значення

$\frac{\mu_\infty}{\mu_0}$ з підвищенням температури монотонно збільшується, що пояснюється наявністю міждолинного розсіювання f -типу в $n-Si$ і відсутністю даного виду розсіювання в $n-Ge$ [8].

Як бачимо при даній концентрації глибоких центрів в кристалах $n-Si$ та $n-Ge$ особливості залежностей $\frac{\mu}{\mu_0} = f(X)$ при різних температурах ті ж, що і у відносно чистих кристалах $n-Si$ та $n-Ge$ без глибоких рівнів в умовах переважно фононного розсіювання [8,9].

Література

1. Conwell E.M., Weisskopf V.F. Theory of impurity scattering in semiconductors // Phys.Rev. — 1950. — V.77, - №3, p. 388-390.
2. Баранский П.И., Буда И.С., Даховский И.В., Коломеец В.В. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках // Киев. Наукова думка, 1977. — 269 с.
3. Баранський П.І., Федосов А.В., Гайдар Г.П. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу. — Луцьк. Надстир'я, 2000. — 280 с.
4. Федосов А.В., Луньов С.В., Захарчук Д.А., Федосов С.А., Тимошук В.С. Визначення швидкості зміщення глибоких енергетичних рівнів в монокристалах кремнію при одноосній пружній деформації // Науковий вісник ВНУ. Серія фізичної науки. — Луцьк: Волинський національний університет ім. Лесі Українки. — 2008, №18.с. 54-58.
5. Конозенко И.Д., Семенюк А.К., Хиврич В.И. Радиационные эффекты в кремнии. — Киев: Наукова думка, 1974. — 200 с.
6. Семенюк А.К. Радиационные эффекты в багатодолинних напівпровідниках. -Луцьк. "Надстир'я". — 2001. — 323 с.
7. Федосов А.В., Лунёв С.В., Федосов С.А. Влияние одноосной упругой деформации на подвижность носителей тока в монокристаллах $n-Si$ при наличии глибоких энергетических уровней. // Материалы 8-й Международной конференции. — Минск. — 2009. — С.357-359.
8. Баранский П.И., Коломеец В.В., Федосов А.В. Отличительные особенности пьезосопротивления германия и кремния n -типа, обусловленные различием механизмов рассеяния электронов в этих кристаллах // ФТП. — 1981. - Т.15, В.4. -С.698-701.
9. Федосов А.В. Кинетические эффекты в многодолинных полупроводниках ($n-Si$ и $n-Ge$) при одноосной упругой деформации: Дис. д-ра физ.-мат. наук, 01.04.10 / Ин-т полупроводников АН Украины. К., 1992. — С. 83-112.