

УДК 621.315.592

## ПІДВИЩЕННЯ РУХЛИВОСТІ НОСІЇВ СТРУМУ В ОДНОВІСНО ДЕФОРМОВАНИХ КРИСТАЛАХ $n-Si$ ТА $n-Si$ З ІЗОВАЛЕНТНОЮ ДОМІШКОЮ ГЕРМАНІЮ

**А. В. Федосов**<sup>1</sup>, **С. В. Луньов**<sup>1</sup>, **С. А. Федосов**<sup>2</sup>, **С. Я. Місюк**<sup>1</sup>, **А. М. Коровицький**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет  
(Вул. Львівська 75, Луцьк 43018, Україна; e-mail: luniovser@mail.ru)

<sup>2</sup>Волинський національний університет імені Лесі Українки  
(Пр. Воли 13, Луцьк 43025, Україна; e-mail: ftt@univer.lutsk.ua)

### ПІДВИЩЕННЯ РУХЛИВОСТІ НОСІЇВ СТРУМУ В ОДНОВІСНО ДЕФОРМОВАНИХ КРИСТАЛАХ $n-Si$ ТА $n-Si$ З ІЗОВАЛЕНТНОЮ ДОМІШКОЮ ГЕРМАНІЮ

**А. В. Федосов**, **С. В. Луньов**, **С. А. Федосов**, **С. Я. Місюк**, **А. М. Коровицький**

**Анотація.** Досліджено вплив сильної одновісної пружної деформації на електрофізичні властивості  $n-Si$  та  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію. Для пружно деформованих кристалів  $n-Si$  та  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію вздовж кристалографічного напрямку [100] характерною особливістю температурних залежностей  $\lg \rho = f(\lg T)$  є перехід від нахилу 1,68 до 1,83, що пояснюється активним вкладом  $g$ -переходів в міждолинне розсіювання при  $T > 330 K$ . При цьому знімаються  $f$ -переходи з міждолинного розсіювання і рухливість електронів зростає, що може бути використаним для підвищення рухливості носіїв струму в каналах  $n$ -МОН транзисторів.

**Ключові слова:** деформація, рухливість, міждолинне розсіювання, транзистор

### THE INCREASING OF CARRIERS CURRENT MOBILITY IN UNIAXIAL DEFORMED CRYSTALS $n-Si$ AND $n-Si$ WITH THE ISOVALENT IMPURITY OF GERMANIUM

**А. В. Федосов**, **С. В. Луньов**, **С. А. Федосов**, **С. Я. Місюк**, **А. М. Коровицький**

**Abstract.** An influence of strong uniaxial elastic deformation on property  $n-Si$  and  $n-Si$  with the isovalent impurity of germanium are investigated. For the resiliently deformed crystals  $n-Si$  and  $n-Si$  with the isovalent impurity of germanium along crystallography direction by [100] the characteristic feature of temperature dependences  $\lg \rho = f(\lg T)$  is transition from inclination 1,68 by 1,83, that is explained an active contribution  $g$ -transition to intervalley scattering at  $T > 330 K$ .  $f$ -transitions are thus taken off from intervalley scattering and mobility of electrons grows, that can be used for the increase of carriers current mobility in channel of  $n$ -MOS transistors.

**Keywords:** deformation, mobility, intervalley scattering, transistor

### ПОВЫШЕНИЕ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА В ОДНООСНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ $n-Si$ ТА $n-Si$ С ИЗОВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСЬЮ ГЕРМАНИЯ.

**А. В. Федосов**, **С. В. Лунёв**, **С. А. Федосов**, **С. Я. Мисюк**, **А. М. Коровицкий**

**Аннотация.** Исследовано влияние сильной одноосной упругой деформации на свойства  $n-Si$  и  $n-Si$  с изовалентной примесью германия. Для упруго деформированных кристаллов  $n-Si$  и  $n-Si$  с изовалентной примесью германия вдоль кристаллографического на-

правления [100] характерной особенностью температурных зависимостей  $\lg \rho = f(\lg T)$  есть переход от наклона 1,68 до 1,83, что объясняется активным вкладом  $g$  - переходов в междолинное рассеяние при  $T > 330 \text{ K}$ . При этом снимаются  $f$  - переходы из междолинного рассеивания и подвижность электронов растет, что может быть использованным для повышения подвижности носителей тока в каналах  $n$ -МОН транзисторов.

**Ключевые слова:** деформация, подвижность, междолинное рассеяние, транзистор

Відомо, що фірма Intel Corporation буде використовувати в 65 нм технології виробництва електронних приладів одновісну деформацію каналу  $n$ -МОН транзисторів [1,2]. Оскільки для виробництва приладів буде використовуватись кремній, то доцільно розглянути вплив одновісної деформації на електричні властивості даного матеріалу. Зокрема, відомо, що з рухливістю носіїв струму безпосередньо пов'язані такі важливі параметри МОН транзисторів, як крутизна характеристики та гранична частота їх переключення.

В роботі [3] досліджено вплив сильної одновісної пружної деформації на властивості  $n-Si$  та  $p-Si$  в температурному інтервалі 78 — 300 К. Великий практичний інтерес представляє дослідження впливу одновісної пружної деформації на електрофізичні властивості кремнію при температурах дещо вищих за кімнатну, що і було зроблено в нашій роботі.

З цією метою нами було проведено дослідження поздовжнього п'єзоопору кристалів  $n-Si$  з вихідною концентрацією носіїв струму  $1,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  і питомим опором  $\rho_{300\text{K}} = 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  та кристалів  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію з вихідною концентрацією носіїв струму  $3,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , питомим опором  $\rho_{300\text{K}} = 3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  та концентрацією ізовалентної домішки германію  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  в температурному інтервалі 295—365 К.

Відомо, що в  $n-Si$  можливе міждолинне розсіяння електронів двох типів:  $g$  - розсіяння (між долинами, які розміщені на одній осі) і  $f$  - розсіяння (між долинами, які розміщені на взаємноперпендикулярних осях) [4,5]. Результати багатьох робіт не дають однозначної відповіді відносно домінуючої ролі  $f$  чи  $g$  - переходів [4—7]. Зокрема в роботі [4] показано, що визначальними в міждолинному розсіянні для  $n-Si$  в температурному інтервалі 78—300 К є  $f$  - переходи.

На рис. 1, 2 представлено температурні залежності  $\frac{\rho_X}{\rho_0} = f(X)$  для  $n-Si$  та  $n-Si$  з ізо-

валентною домішкою германію в умовах  $X // J // [100]$ . Як відомо [8], п'єзоопір для даного кристалографічного напрямку в  $n-Si$  та в  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію зумовлений переселенням носіїв струму з чотирьох долин з більшою рухливістю  $\mu_{\perp}$ , які піднімаються вгору на величину

$$\Delta E_1 = -(\Xi_d + \frac{1}{3}\Xi_u)(S_{11} - S_{12})X + \frac{1}{3}\Xi_u(S_{11} - S_{12})X, (1)$$

у дві долини з меншою рухливістю  $\mu_{\parallel}$ , які опускаються вниз за шкалою енергій на величину

$$\Delta E_2 = -(\Xi_d + \frac{1}{3}\Xi_u)(S_{11} - S_{12})X - \frac{2}{3}\Xi_u(S_{11} - S_{12})X, (2)$$

що веде спочатку до зростання залежності  $\frac{\rho_X}{\rho_0} = f(X)$  з подальшим виходом на насичення.

Внаслідок цього між еліпсоїдами двох груп виникає енергетична щілина:

$$\Delta E = \Xi_u(S_{11} - S_{12})X, (3)$$

де  $\Xi_u$  і  $\Xi_d$  — константи деформаційного потенціалу,  $S_{11}$  і  $S_{12}$  — константи жорсткості.

Наявність плато на залежностях  $\frac{\rho_X}{\rho_0} = f(X)$

рис. 1 і рис. 2 вказує на відсутність  $f$  - переходів в міждолинному розсіянні в  $n-Si$  та  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію при сильних одновісних деформаціях, хоча  $g$  - переходи при цьому можуть себе і проявляти.

На рис. 3, 4 представлено температурні залежності  $\rho = \rho(T)$  для пружно деформованих кристалів  $n-Si$  та  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію вздовж кристалографічного напрямку [100]. Як видно з рис. 3, 4, характерною особливістю даних залежностей (в координатах  $\lg \rho = f(\lg T)$ ) є перехід від нахилу 1,68 до 1,83 при  $T > 330 \text{ K}$ , що пояснюється очевидно активним вкладом  $g$  - переходів в міждолинне розсіяння. Зокрема в роботі [9] на основі теорії анізотропного розсіювання з врахуванням міждолинних переходів були проведені теоретичні розрахунки залежності  $\rho = \rho(T)$  для пружно

деформованих кристалів  $n-Si$ , які добре узгоджуються з одержаними експериментальними результатами. Слід відмітити, що для недеформованих кристалів  $n-Si$  при  $T > 100 K$  нахил залежності  $\rho = \rho(T)$  змінюється від  $\rho \sim T^{1,68}$  до  $\rho \sim T^{2,3}$ . Для кристалів кремнію з ізовалентною домішкою германію, зміна нахилу залежності  $\rho = \rho(T)$  відбувається при  $T > 200 K$ , оскільки при цьому проявляється ще механізм розсіювання носіїв струму на ізовалентних домішках  $Ge$  [10].

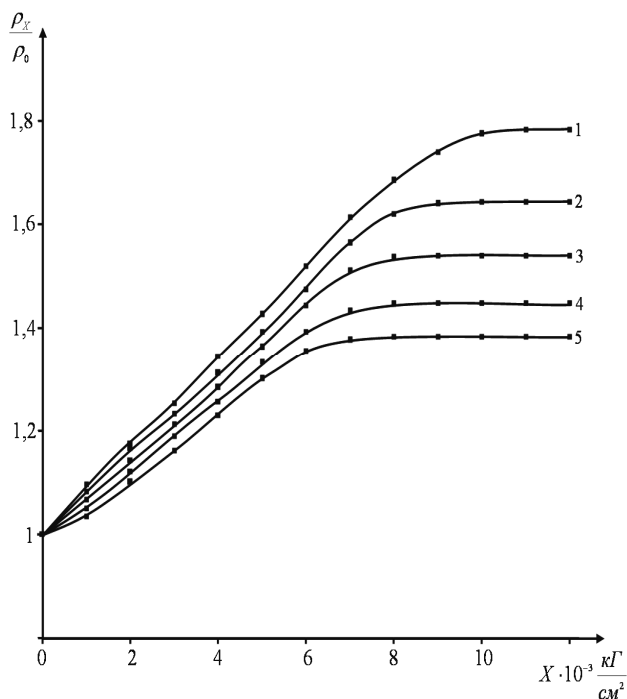


Рис. 1. Залежності  $\frac{\rho_x}{\rho_0} = f(X)$  для  $n-Si$  при різних температурах  $T, K$ : 1—295, 2—313, 3—333, 4—353, 5—363.

Отже, при температурах дещо вищих за кімнатну вклад  $g$ -переходів в міждолинне розсіювання в кристалах  $n-Si$  та  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію стає досить відчутним, на відмінну від міждолинного розсіювання в температурному інтервалі  $78-300 K$ , де роль  $g$ -переходів була другорядною [4].

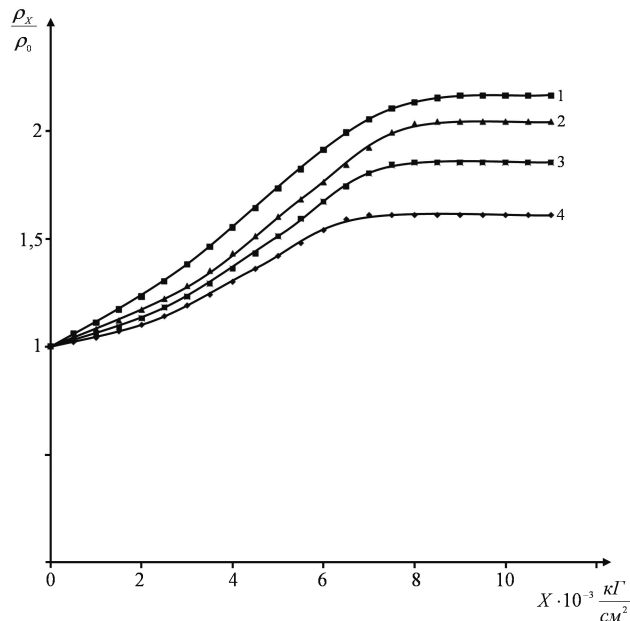


Рис. 2. Залежності  $\frac{\rho_x}{\rho_0} = f(X)$  для  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію при різних температурах  $T, K$ : 1—300, 2—320, 3—340, 4—365.

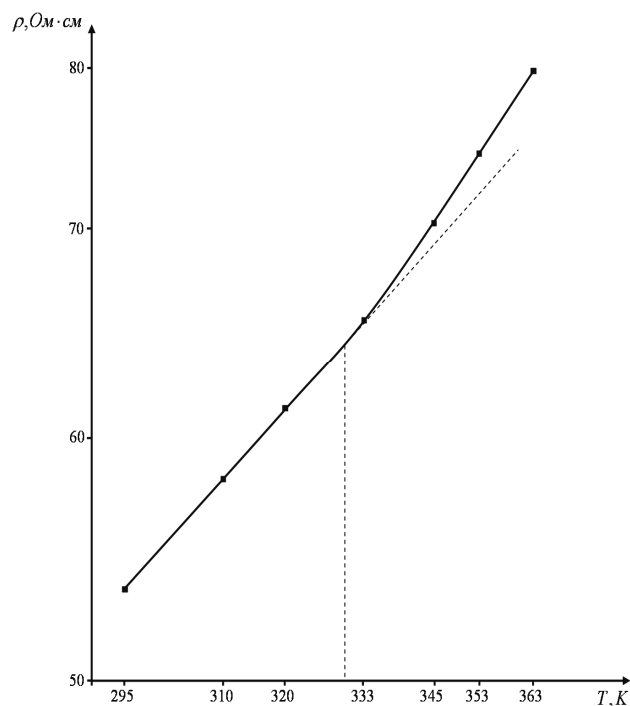


Рис. 3. Залежність  $\rho = \rho(T)$  в подвійному логарифмічному масштабі для  $n-Si$  при  $X = 13000 \frac{кГ}{см^2}$ .

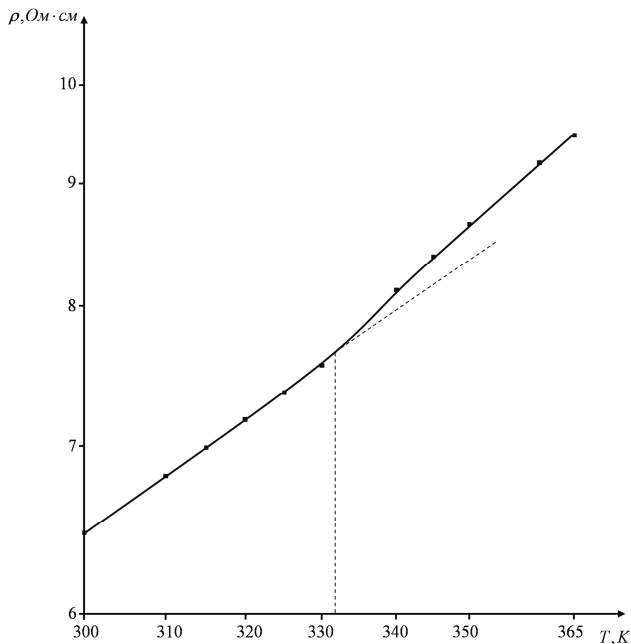


Рис. 4. Залежність  $\rho = \rho(T)$  в подвійному логарифмічному масштабі для  $n-Si$  з ізовалентною домішкою германію при  $X = 12000 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$ .

### Література

1. Thompson S. et al., IEDM Tech. Dig., 2002. — P. 61–64.
2. Ghani T. et al., IEDM Tech. Dig., 2003. — P. 978–980.
3. Єрмаков В. М., Федосов А. В., Коломонец В. В., Горін А. Е. Використання тензорезистивного ефекту в  $n-Si$  та  $p-Si$  для підвищення рухливості носіїв струму в каналах n-МОН та p-МОН транзисторів // Наук. вісн. КУЕІТУ. — 2008. — № 2. — С. 48–51.
4. Баранский П. И., Даховский И. В, Коломонец В. В., Федосов А. В. Междолинное рассеяние в  $n-Si$  в температурном интервале 78–300 К // Физика и техника полупроводников. — 1976. — Т. 10, № 8. — С. 1480–1482.
5. Long D. Scattering of conduction electrons by lattice vibrations in silicon // Phys. Rev. — 1960. — v. 120, № 6. — p.2024–2032.
6. Цыпленков В. В., Демидов Е. В., Ковлевский К. А, Шастин В. Н. Релаксация возбужденных состояний доноров в кремнии с излучением междолинных фононов // Физика и техника полупроводников. — 2008. — Т. 42, № 9. — С. 1032–1037.
7. Цыпленков В. В., Ковлевский К. А, Шастин В. Н. Влияние одноосной деформации на релаксацию возбужденных состояний доноров в кремнии при взаимодействии с междолинными фононами // Физика и техника полупроводников. — 2009. — Т. 43, № 11. — С. 1450–1455.
8. Баранский П. И., Буда И. С., Даховский И. В., Коломонец В. В. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках — К.: Наукова думка, 1977. — 269 с.
9. Федосов А. В., Захарчук Д. А., Луньов С. В.. Дослідження анізотропії розсіяння носіїв струму в кристалах  $n-Si$  // Тези XXIV науково — технічної конференції професорсько — викладацького складу “Актуальні проблеми та перспективи науки і виробництва”. — Луцьк: Луцький національний технічний університет. — 2009 р. — С. 205 — 207.
10. Семенюк А. К. Радіаційні ефекти в багатодлинних напівпровідниках — Луцьк : Надстир’я, 2001. — 323 с.