ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 4, № 3 (2000) с. 318–320

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 4, No. 3 (2000) p. 318–320

ВПЛИВ ІЗОВАЛЕНТНОЇ ДОМІШКИ Ge НА П'ЄЗООПІР КРЕМНІЮ

А. В. Федосов, М. В. Хвищун, Л. В. Ящинський
Луцький державний технічний університет,
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43000, Україна

(Отримано 18 листопада 1999 р.; в остаточному вигляді — 22 березня 2000 р.)

Ізовалентні домішкові атоми Ge є електрично пасивними центрами в кристалах Si, а тому їхній вплив на оптичні та електричні властивості кремнію визначаються наявністю в кристалах внутрішніх деформаційних полів, які виникають через невідповідність ковалентних радіусів германію ($R_{\mathrm{Ge}} = 1.22$ Å й атомів кремнію ($R_{\mathrm{Si}} = 1.17$ Å).

Існування полів внутрішніх напружень у кристалах з ізовалентними домішками робить актуальним дослідження їхнього впливу на кінетичні ефекти, оскільки в деформованому кристалі енерґетичний стан електрично активних центрів під дією поля пружної деформації змінюється. Виявленню впливу таких полів внутрішніх напружень на п'єзоопір n–Si і присвячена наша праця.

Ключові слова: ізовалентні домішки, поле внутрішніх напружень, кінетичні ефекти.

PACS number(s): 72.20.–i, 73.20.Hb

Існування полів внутрішніх напружень у кристалах з ізовалентними домішками робить актуальними дослідження їхнього впливу на кінетичні ефекти, оскільки в деформованому кристалі енерґетичний стан електрично активних центрів під дією поля пружної деформації змінюється.

Виявленню впливу таких полів внутрішніх напружень на п'єзоопір n–Si і присвячена наша праця.

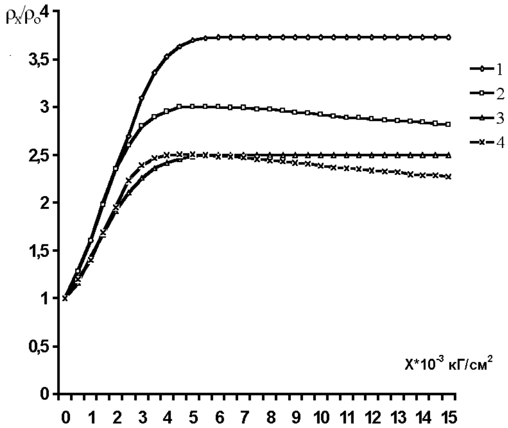

Рис. 1. Залежності $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ для n–Si при температурі $T = 78$ К з концентрацією домішки фосфору, N_d, см$^{-3}$: 1 — $1.7 \cdot 10^{14}$, 2 — $1.5 \cdot 10^{15}$, 3 — $2 \cdot 10^{16}$ ($N_{\mathrm{Ge}} = 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$), 4 — $7 \cdot 10^{15}$.

Збільшення концентрації атомів електрично активної леґуючої домішки ($N_d > 10^{15}$см$^{-3}$) приводить до перекриття їхніх хвильових функцій та утворення домішкової зони. Наявність такої зони означає появу глибших енерґетичних станів у забороненій зоні Si (хвостів густини станів), які йонізуються в широкому температурному інтервалі [1], змінюючи тим самим концентрацію електронів у зоні провідности (c–зоні). Зміна степеня перекриття хвильових функцій домішкових атомів під дією одновісної пружної деформації (ОПД) також може впливати на енерґію активації таких домішкових атомів і, відповідно, на концентрацію носіїв заряду в c–зоні.

У нашій роботі досліджено п'єзоопір кристалів n–Si з декількома різними концентраціями домішки фосфору, а також кремній — спеціяльно леґований ізовалентною домішкою германію ($N_{\mathrm{Ge}} = 5 \cdot 10^{18}$см$^{-3}$) і фосфору ($N_p = 2 \cdot 10^{16}$см$^{-3}$). Механічне напруження, прикладене до зразків уздовж кристалографічного напряму [100], який збігається з напрямом росту кристала, змінювалось у діяпазоні 0–15000 кГ/см^2. На рис. 1 наведено результати вимірювання поздовжнього п'єзоопору при $T = 78$ К для випадку $X//J//$ [100]. Як видно, для кристалів n–Si з порівняно малою концентрацією домішки фосфору (крива 1) залежність $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ виходить на насичення при $X \approx 6000$ кГ/см^2 (після повного переселення носіїв у долини, що опустилися) без подальшої зміни питомого опору (ρ) з прикладеною ОПД. Якісно від цієї залежности відрізняються криві 2, 4 рис. 1, які проходять через максимум з подальшим зменшенням питомого опору при збільшенні механічних напружень. Такий вигляд залежностей пояснюється, згідно з [2,3], одночасною дією двох основних причин, що зумовлюють наявність п'єзоопору:

— перерозподілом носіїв заряду між долинами, що піднімаються й опускаються при ОПД, який приводить до зростання $\rho = f(X)$ через зменшення середньої рухливости електронів;

— збільшенням концентрації носіїв заряду в c–зоні за рахунок зменшення енерґетичної щілини з деформацією між станами домішкових центрів і дном c–зони, що і викликало спад $\rho = f(X)$.

Притому, як видно, зі збільшенням концентрації леґуючої домішки фосфору спадання залежности $\rho = f(X)$ затягується в ділянку більших механічних напружень.

Ситуація змінюється, коли в кремній, крім електрично активної домішки фосфору, вводиться значної концентрації електрично пасивна домішка германію. Залежність $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ для таких зразків n–Si зображена на рис. 1 кривою 3. Видно, що ця залежність із чітким виходом на насичення якісно нагадує залежність 1 відсутністю другої причини, що зумовлює після максимуму наявність п'єзоопору в кристалах n–Si з домішковою зоною, хоча в цьому випадку концентрація домішки фосфору найбільша ($2 \cdot 10^{16}$см$^{-3}$) серед досліджуваних кристалів. Підтвердженням того, що відповідальна за наявність п'єзоопору в цих (крива 3) та мало леґованих кристалах n–Si (крива 1) лише перша причина, є повний збіг експериментальних залежностей (1, 3 рис. 1) з теоретично розрахованими (ромби і трикутники) згідно з

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = \frac{(1+2C)(1+2K)}{3(1+2CK)},$$

де

$$\mathrm{C} = \frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{\Xi_u(S_{11}-S_{12})X}{kT}\right)$$

— відношення концентрації носіїв заряду (n_2) в долині, що піднімається, до концентрації (n_1) їх у долині, яка опускається; S_{11} і S_{12} — модулі пружности, Ξ_u — константа деформаційного потенціялу зсуву;

$$K = \frac{\mu_\perp}{\mu_{II}} = \frac{3\rho_\infty}{2\rho_0} - \frac{1}{2},$$

(3) — параметр анізотропії рухливости, а ρ_∞ — значення питомого опору в ділянці насичення $\rho = f(X)$.

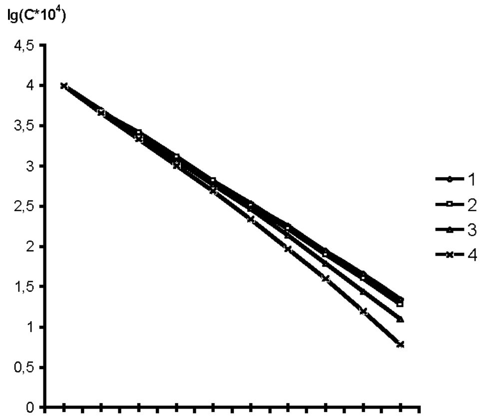

Рис. 2. Залежності $\lg(C \cdot 10^4) = f(X)$ для n–Si з концентрацією домішки фосфору, N_d, см$^{-3}$: 1 — $1.7 \cdot 10^{14}$, 2 — $2 \cdot 10^{16}$, 3 — $1.5 \cdot 10^{15}$, 4 — $7 \cdot 10^{15}$.

Обробка залежностей 1, 3 (рис. 1), згідно з методикою [4], дає, як видно з рис. 2, лінійні залежності функції $\lg(C \cdot 10^4) = f(X)$, де C визначається згідно з:

$$C = \frac{1}{2}\frac{1-\frac{\rho_x}{\rho_\infty}}{\frac{\rho_x}{\rho_\infty}K-1}.$$

Нахил одержаної прямої (ромби та квадрати) дає, як і в праці [4], значення константи деформаційного потенціялу зсуву 9.3 еВ, підтверджуючи тим самим наявність у таких кристалах лише одного больцманівського перерозподілу носіїв заряду між долинами, що піднімаються й опускаються з тиском. Відхилення від лінійности для двох інших досліджуваних зразків (трикутники і хрестики) вказує на зміну концентрації носіїв заряду в c–зоні при звільненні їх ОПД з локалізованих станів домішкової зони (наявність другої причини) [3,4]. Сімейство залежностей $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ (рис. 3), одержаних при різних температурах, чітким виходом на насичення також підтверджує відсутність йонізації ОПД домішкових центрів фосфору в кристалах n–Si леґованих Ge. Порушення послідовности в розміщенні кривих $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ при збільшенні температури свідчить про складний характер зміни внеску різних механізмів розсіювання в таких кристалах і буде предметом подальших досліджень та обговорення результатів.

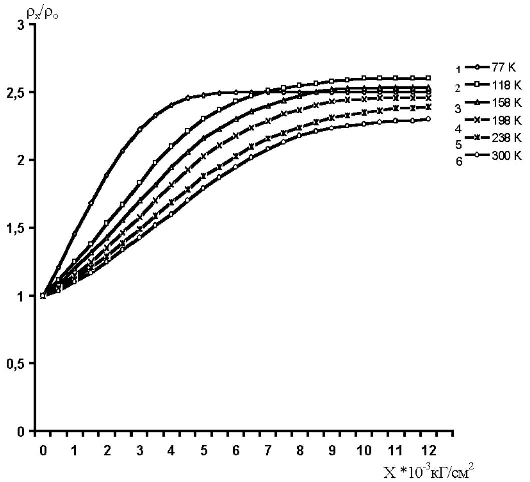

Рис. 3. Залежності $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ для n–Si ($N_d = 2 \cdot 10^{16}$см$^{-3}$, $N_{\mathrm{Ge}} = 5 \cdot 10^{18}$см$^{-3}$) при різних температурах T, К: 1 — 77, 2 — 118, 3 — 158, 4 — 198, 5 — 238, 6 — 300.

Оскільки з одержаних результатів виходить, що за наявности електрично пасивної домішки германію $5 \cdot 10^{18}$см$^{-3}$ в кристалах кремнію з указаною концентрацією домішки фосфору ($2 \cdot 10^{16}$см$^{-3}$) не спостерігається йонізації електрично активних домішкових центрів прикладеною одновісною пружною деформацією (наявність чіткого плато на залежності рис. 1 після виходу на насичення і незмінности концентрації носіїв заряду в зоні провідности, що випливає з холлівських вимірювань), то природно припустити, що енерґетичні стани цих центрів уже змінені наявністю в кристалах внутрішніх деформаційних полів, які виникають унаслідок різниці ковалентних радіусів атомів кремнію ($R_{\mathrm{Si}} = 1.17$ Å) і германію ($R_{\mathrm{Ge}} = 1.22$ Å). На основі аналізу експериментальних результатів оцінено, що величина внутрішніх напружень сягає до $4 \cdot 10^3$ кГ/см^2.

Існування полів внутрішніх напружень у кристалах Si з ізовалентними домішками експериментально виявлене за допомогою тензочутливих парамагнетних зондів [5] і досліджено вплив їх на оптичні властивості кристалів [6, 7], а тому вивчення впливу таких деформаційних полів на кінетичні ефекти робить їх актуальними і в наш час.

[1] S. S. Li, W. R. Thurber, Sol. St. Electron. **20**, 609 (1977).
[2] В. В. Коломоец, А. В. Федосов, В. П. Шаповалов, Физ. техн. полупр. **10**, 1390 (1976).
[3] П. И. Баранский, В. В. Коломоец, Ю. А. Охрименко, А. В. Федосов, Физ. техн. полупр. **16**, 361 (1982).
[4] П. И. Баранский, И. В. Даховский, В. В. Коломоец, А. В. Федосов, Физ. техн. полупр. **10**, 1387 (1976).
[5] В. Е. Кустов, М. Г. Мильвидский, Ю. Г. Семенов, Б. М. Туровский, В. И. Шаховцов, В. А. Шиндич, Физ. техн. полупр. **20**, 270 (1988).
[6] Л. В. Мизрухин, Л. И. Хируненко, В. И. Шаховцов, В. К. Шинкаренко, В. И. Яшник, Физ. техн. полупр. **23**, 704 (1989).
[7] Л. В. Мизрухин, Л. В. Мильвидский, Л. В. Хируненко, В. И. Шаховцов, В. К. Шинкаренко, Н. И. Горбачева, Физ. техн. полупр. **20**, 1647 (1986).

THE EFFECT OF ISOVALENT IMPURITY OF GERMANIUM ON PIEZORESISTANCE OF SILICON

A. V. Fedosov, M. V. Khwishchun, L. V. Jashchynskij
The State Technical University of Lutsck,
75 Lvivs'ka Str., Lutsk, UA–43000, Ukraine

Isovalent impurity atoms of germanium are electrically passive regions in the Si–crystals and for this reason their influence upon optical and electrical properties of germanium is determined by the presence of the internal deformation fields which arise as a result of discrepancy of covalent atom radii of germanium ($R_{\mathrm{Ge}} = 1.22$ Å) and silicon ($R_{\mathrm{Si}} = 1.17$ Å). The existance of internal stresses in crystals with isovalent impurity determines the actuality of researching their influence upon the kinetic effects, since the energy state of electrically passive region is changing in deformed crystal under the action of elastic strain field. The present paper is devoted to study the effect of the above mentioned fields of internal stress on piezoresistancs of n–Si–crystals.