

12. Koughia K. V. Advances in Disordered Semiconductors: Transport, Correlation and Structural Defects / K. V. Koughia, I. S. Shlimak // World Scientific Publishing Company / ed. by H. Fritzsche. – 1990. – Vol. 3. – P. 213.
13. Lerner L. S. CuGaSe₂ and AgInSe₂: Preparation and properties of single crystals / L. S. Lerner // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1966. – Vol. 27. – №. 1. – P. 1–8.
14. Lekse J. W. Understanding solid-state microwave synthesis using the diamond-like semiconductor, AgInSe₂, as a case study / J. W. Lekse, A. M. Pischera, J. A. Aitken // Materials research bulletin. – 2007. – Vol. 42. – №. 3. – P. 395–403.
15. Manifestation of intrinsic defects in the band structures of quaternary chalcogenide Ag₂In₂SiSe₆ and Ag₂In₂GeSe₆ crystals / I. V. Kityk, G. Myronchuk, O. Zamuraeva et al. // CrystEngComm. – 2014. – Vol. 16. – P. 9534.
16. Olekseyuk I. D. Phase equilibria in the AgGaS₂–GeS₂ Systems / I. D. Olekseyuk, G. P. Gorgut, M. V. Shevchuk // Polish J. Chem. – 2002. – Vol. 76. – P. 915.
17. Olekseyuk I. D. The Phase Equilibria on AgGaS₂/AgInS₂/–HgS Section in the Quasi-Ternary Ag₂S–HgS–Ga₂S₃/In₂S₃/Systems / I. D. Olekseyuk, O. V. Krykhovets, L. V. Sysa // Polish J. Chem. – 1999. – Vol. 73. – P. 287.
18. Phase relations in the quasi-binary Cu₂GeS₃–ZnS and quasi-ternary Cu₂S–Zn(Cd)S–GeS₂ systems and crystal structure of Cu₂ZnGeS₄ / O. V. Parasyuk, L. V. Piskach, Y. E. Romanyuk et al. // Alloys Compd. – 2005. – Vol. 397. – P. 85.
19. Synthesis and characterization of AgInSe₂ for application in thin film solar cells / H. Mustafa et al. // Thin solid films. – 2007. – Vol. 515. – №. 17. – P. 7001–7004.
20. The Ag₂S–In₂S₃–Si(Ge)S₂ systems and crystal structure of quaternary sulfides Ag₂In₂Si(Ge)S₆ / V. P. Sachanyuk, G. P. Gorgut, V. V. Atuchin et al. // J. Alloys Compd. – 2008. – Vol. 452. – P. 348.
21. The phase equilibria in the quasi-ternary Ag₂SeGa₂Se₃GeSe₂ system / I. D. Olekseyuk, G. P. Gorgut, O. V. Parasyuk // J. Alloys Compd. – 1997. – Vol. 260 – P. 111.

Замуруева Оксана, Мирончук Галина, Парасюк Олег, Шаварова Анна. Кинетика релаксациі фотопроводимості в кристалах Ag₂In₂Si(Ge)Se₆. В роботі досліджена кинетика фотопроводимості твердих розчинів Ag₂In₂Si(Ge)Se₆. Досліджувані зразки характеризуються довготривалою релаксацією фотопроводимості при $T = 77\text{--}300$ К. Дані про релаксацію фотопроводимості проаналізовані на основі представлень про рівні прилипання і рекомбінаційні рівні. Кинетика релаксациі нерівноважної провідності сполучень Ag₂In₂Si(Ge)Se₆ відповідає випадку експоненціальної рекомбінації. Визначені основні параметри, що визначають релаксацію фотопроводимості. Показано, що при збільшенні температури, часи релаксациі фотопроводимості повільної і швидкої складових зменшуються.

Ключові слова: фотопроводимість, релаксація, центри прилипання.

Zamurujeva Oksana, Myronchuk Halyna, Parasyuk Oleh, Shavarova Hanna. The Kinetics of Photoconductivity Relaxation of Solid Solutions Ag₂In₂Si (Ge) Se₆. The test samples are characterized by long-term relaxation of the photoconductivity at $T = 77\text{--}300$ K. The experimental data on photoconductivity relaxation are analyzed in terms of trapping and recombination levels. Relaxation kinetics of non-equilibrium conductivity of Ag₂In₂Si (Ge) Se₆ compounds corresponds to an exponential recombination. The main parameters, determining the photoconductivity relaxation, have been obtained. It is shown that with increasing of the temperature, the relaxation time of photoconductivity of slow and fast components reduce.

Key words: photoconductivity, relaxation, trapping centers.

Стаття надійшла до редколегії
11.06.2014 р.

УДК 621.315.592

Юрій Коваль

Особливості залежностей питомого опору в монокристалах n-Si, легованих Ge

Методами поздовжнього п'єзоопору і двозондовим компенсаційним методом виміряно питомий опір, а також поданими результатами вимірювань ефекту Холла досліджено вплив домішки германію на неоднорідність питомого опору в кристалі кремнію. Як показали вимірювання, спостерігається незначна відмінність у

ході залежностей $\rho = f(X)$, отриманих на кристалах $n\text{-Si}\langle Ge \rangle$, вирізаних уздовж і перпендикулярно осі росту кристала. Більш суттєво відрізняються залежності градієнтів питомого опору, одержані на тих самих кристалах двозондовим методом. Виявлені відмінності пов'язані із нерівномірним розподілом домішок у шарах росту кристалів, що вказує на складний характер розподілу неоднорідностей у кристалі, зумовлений впливом ізовалентної домішки (ІВД).

Ключові слова: кремній, германій, ізовалентна домішка, неоднорідності, кінетичні ефекти.

Постановка наукової проблеми та її значення. У слабо концентрованих твердих розчинах $n\text{-Si}\langle Ge \rangle$ атоми неосновної компоненти впливають на явища перенесення заряду як нейтральні елементарні розсіювальні центри, а також як нейтральні чи заряджені комплекси, які виникають при взаємодії з атомами домішок.

Автори [1] встановили, що атоми ІВД, які є джерелами напружень у кристалічній ґратці, діють як центри захоплення власних точкових дефектів – вакансій (V) або міжвузлових атомів (I). Зв'язування в комплекс V та I визначається співвідношенням ковалентних радіусів ІВД ($R_{ІВД}$) і матриці (R_m). Так, якщо $R_{ІВД} > R_m$, то ІВД є центром захоплення вакансій, а при $R_{ІВД} < R_m$ вони зв'язують в комплекси міжвузлові атоми. Вводячи різні ІВД, можна, не змінюючи електричних параметрів матриці, керувати тими властивостями кристалів, у формуванні яких беруть активну участь власні точкові дефекти структури.

Через невідповідність ковалентних радіусів германію ($R_{Ge} = 1,22 \text{ \AA}$) і кремнію ($R_{Si} = 1,17 \text{ \AA}$) виникають поля внутрішніх напружень, які впливають на кінетичні ефекти, оскільки в деформованому кристалі енергетичний стан електрично-активних центрів під дією поля пружної деформації змінюється [2].

Мета роботи – експериментально дослідити вплив ізовалентної домішки германію на залежності питомого опору в кристалах кремнію. **Завдання** – отримати залежності п'єзоопору та розподілу питомого опору по довжині зразків, вирізаних паралельно та перпендикулярно до осі росту кристала.

Методика і техніка експерименту. Щоб дослідити особливості впливу ІВД германію на неоднорідність питомого опору у кристалах кремнію, проводились вимірювання зразків $n\text{-Si}\langle Ge \rangle$, вирощених методом Чохральського в напрямі [100] з питомим опором 0,25 Ом·см. Зразки вирізали уздовж осі росту кристалу, а також перпендикулярно напрямові росту. Для порівняння досліджувались також зразки кремнію, легованого лише домішкою фосфором.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. В ході досліджень були отримані залежності п'єзоопору $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ (рис. 1) для зразків кремнію з домішкою германію ($N_{Ge} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) (залежності 2, 3) та для кристалів кремнію з різними концентраціями домішки фосфору (залежності 1, 4).

Механічне напруження змінювалося в інтервалі $0 \div 14\,000 \text{ кГ/см}^2$. Як видно, для кристалів кремнію (крива 1) з малою концентрацією домішки фосфору залежність $\rho_x/\rho_0 = f(X)$ виходить на насичення при 6000 кГ/см^2 . Подібний хід залежностей до кривої 1 спостерігається і для кривих 2 й 3. Проте якісно від цих залежностей відрізняється крива 4, яка проходить через максимум з подальшим зменшенням питомого опору при збільшенні механічних напружень. Такий хід кривої 4 можна пояснити одночасною дією двох механізмів, що зумовлюють наявність п'єзоопору: 1) перерозподілом носіїв заряду між долинами, що піднімаються й опускаються при одновісній пружній деформації (ОПД), який призводить до зростання питомого опору через зменшення середньої рухливості електронів; 2) збільшенням концентрації носіїв заряду в зоні провідності унаслідок зменшення енергетичної щільності з деформацією між станами домішкових центрів і дном С-зони, що зумовлює спад $\rho = f(X)$.

Як видно із кривих 2, 3, ситуація змінюється, коли крім електрично активної домішки фосфору вводиться електрично пасивна домішка германію. Ці залежності із чітким виходом на насичення якісно нагадують криву 1 відсутністю другої причини, що зумовлює після максимуму наявність п'єзоопору в кристалах кремнію з домішковою зоною.

Підтвердженням того, що відповідальна за наявність п'єзоопору у цих кристалах (криві 2, 3) та мало легованих кристалах $n\text{-Si}$ (крива 1) лише перша причина, є повний збіг експериментальних залежностей (криві 1, 2, 3, рис. 1) з теоретично розрахованими згідно з:

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

де

$$C = \frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{\Xi_u(S_{11} - S_{12})X}{kT}\right) \quad (2)$$

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

$$K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel} = \frac{3\rho_{\infty}}{2\rho_0} - \frac{1}{2}, \quad (3)$$

де K – параметр анізотропії рухливості, а ρ_{∞} – значення питомого опору на ділянці насичення $\rho = f(X)$.

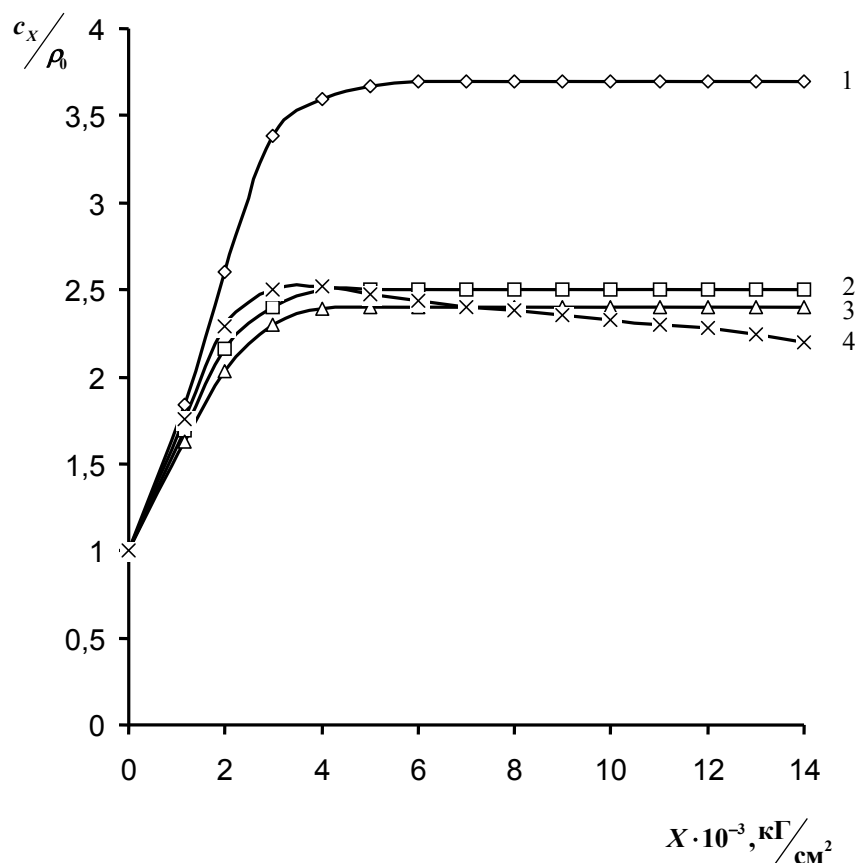


Рис. 1. Залежності $c_x/c_0 = f(X)$ при температурі 78 К з концентрацією фосфору N_D , см^{-3} :

1 – $1,7 \cdot 10^{14}$; 4 – $7 \cdot 10^{15}$; 2 – $2 \cdot 10^{16}$ ($N_{Ge} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) – зразки, вирізані паралельно до напрямку росту;
3 – $2 \cdot 10^{16}$ ($N_{Ge} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) – зразки, вирізані перпендикулярно до напрямку росту

Як показали вимірювання ефекту Холла (рис. 2), спостерігається незначна відмінність у перебігу температурних залежностей $\mu = f(T)$ для зразків, вирізаних уздовж напрямку росту і перпендикулярно осі росту, а саме рухливість уздовж напрямку росту дещо менша, ніж у напрямку, перпендикулярному росту, що свідчить про неоднорідність питомого опору в досліджуваних кристалах.

Оскільки з одержаних результатів бачимо, що за наявності електрично пасивної домішки германію $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ у кристалах кремнію з концентрацією домішки фосфору $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ не спостерігається іонізація електрично-активних домішкових центрів при ОПД (наявність плато на залежностях 2, 3 рис. 1 після виходу на насичення), то логічно припустити, що енергетичні стани цих центрів дуже змінені за наявності у кристалах внутрішніх деформаційних полів, які виникають внаслідок різниці ковалентних радіусів атомів кремнію та германію.

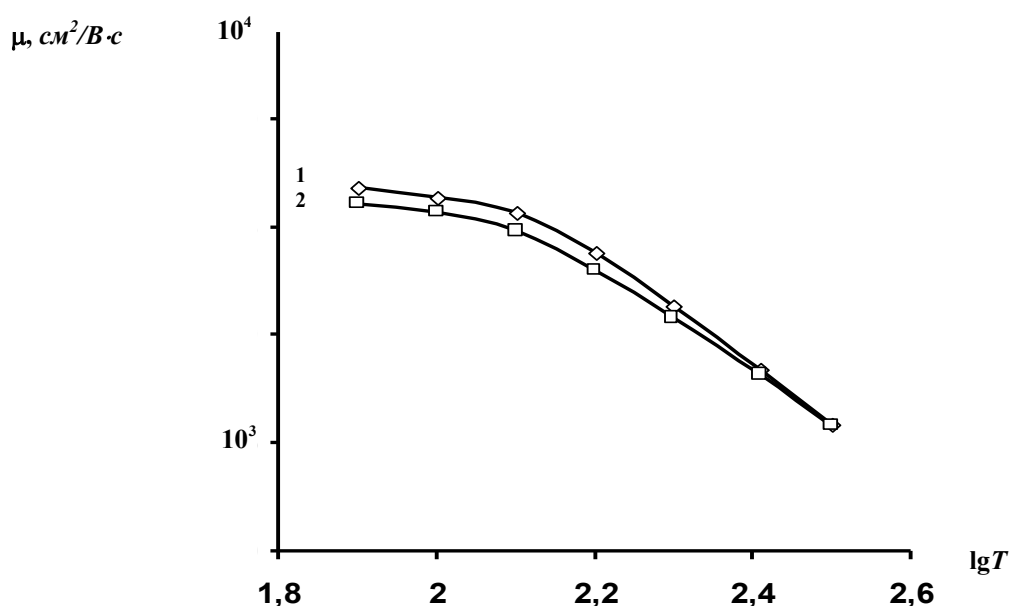


Рис. 2. Залежності $\mu = f(T)$ для зразків $n\text{-Si}\langle\text{Ge}\rangle$, вирізаних:
1 – перпендикулярно; 2 – уздовж напрямку росту

Більш суттєво відрізняються залежності градієнтів питомого опору на згаданих вище кристалах $n\text{-Si}\langle\text{Ge}\rangle$, одержані двозондовим компенсаційним методом (рис. 3). Точність двозондового компенсаційного методу практично мало залежить від питомого опору матеріалу, оскільки струм через вимірювальні зонди при повній компенсації не проходить і вони є потенціальними. Для досягнення локальності 1 мм використовувалася установка, яка забезпечувала відтворюваність результатів вимірювання ρ в межах декількох відсотків, та застосовувались зразки малого поперечного перерізу [3; 4]. Видно, що при вимірюваннях з роздільною здатністю 1 мм відхилення від середнього значення для зразків, вирізаних уздовж і перпендикулярно до напрямку росту, лежать у межах відповідно $0,15 \div 0,25 \%$ та $0,2 \div 0,38 \%$.

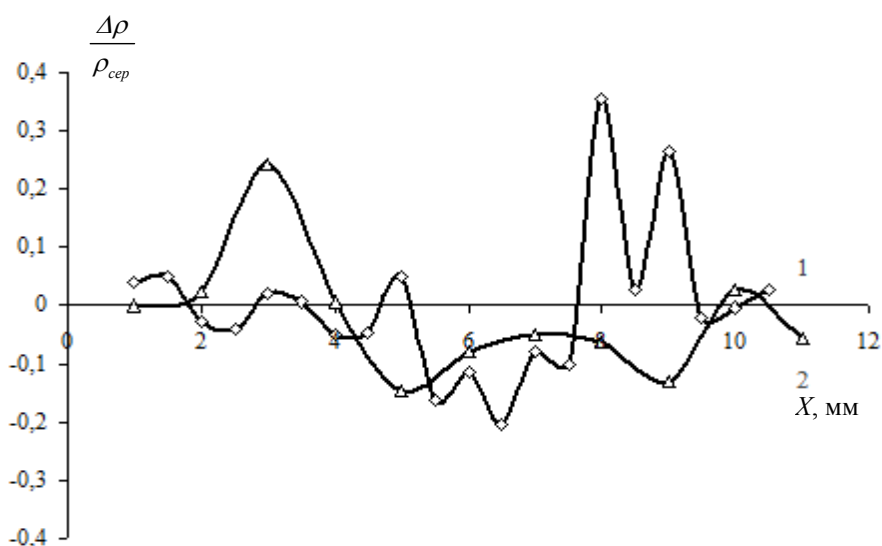


Рис. 3. Відносні відхилення питомого опору від середнього значення для зразків $n\text{-Si}\langle\text{Ge}\rangle$, вирізаних:
1 – перпендикулярно; 2 – паралельно осі росту кристала

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Аналізуючи отримані результати, можна припустити, що причиною неоднорідності питомого опору в кристалах кремнію з ізовалентною домішкою германію є локальні внутрішні напруження, викликані невідповідністю ковалентних радіусів

атомів кремнію та германію. Існування полів внутрішніх напружень у $n\text{-Si}\langle\text{Ge}\rangle$ також експериментально виявили автори інших робіт за допомогою тензочувливих парамагнітних зондів та досліджено їх вплив на оптичні властивості кристалів [5; 6]. Тому вивчення впливу ізовалентної домішки германію, а саме деформаційних полів, які вона створює, на кінетичні ефекти в монокристалах кремнію, надає їм актуальності й сьогодні.

Джерела та література

1. Баженов В. К. Изовалентные примеси в полупроводниках. Состояние проблемы / В. К. Баженов, В. И. Фистуль // ФТП. – 1984. – Т. 18, вып. 8. – С. 1345–1346.
2. Рытова Н. С. Влияние изовалентных примесей – источников упругих напряжений в кристалле на поведение точечных дефектов / Н. С. Рытова, Е. В. Соловьева // ФТП. – 1986. – Т. 20, вып. 8. – С. 1380–1387.
3. Семенюк А. К. Исследование технологических неоднородностей монокристаллов кремния / А. К. Семенюк, О. В. Ковальчук // Электронная техника. – 1983. – Вып. 3. – С. 65–68.
4. Семенюк А. К. Исследование электрофизических параметров кремния, предназначенного для изготовления силовых полупроводниковых приборов : отчет по теме № 4230 / А. К. Семенюк. – Львов, 1987. – С. 108.
5. Упругие напряжения в n-Si с электрически пассивными примесями / Л. В. Мизрухин, Л. В. Хируненко, В. И. Шаховцов и др. // ФТП. – 1989. – Вып. 23. – С. 704.
6. Уширение полос поглощения водородноподобных центров в кремнии с изовалентными примесями / Л. В. Мизрухин, М. Г. Мильвидский, Л. В. Хируненко и др. // ФТП. – 1986. – Т. 20. – С. 1647.

Коваль Юрий. Особенности зависимостей удельного сопротивления в монокристаллах n-Si, легированных Ge. Методами продольного сопротивления и двухзондовым компенсационным методом проводились измерения удельного сопротивления, а также за измерениями эффекта Холла исследовано влияние примеси германія на неоднородность удельного сопротивления в кристалле кремнія. Как показали измерения, наблюдается незначительное отличие в ходе зависимостей $\rho = f(X)$, полученных на кристаллах $n\text{-Si}\langle\text{Ge}\rangle$, вырезанных вдоль и перпендикулярно оси роста. Более существенно отличаются зависимости градиентов удельного сопротивления, полученные на тех же кристаллах двухзондовым методом. Выявленные отличия связаны с неравномерным распределением примесей в шарах роста кристаллов. Это свидетельствует о сложном характере распределения неоднородностей в кристалле, обусловленным влиянием изовалентной примеси.

Ключевые слова: кремний, германий, изовалентная примесь, кинетические эффекты.

Koval Yurii. Features of Dependences of Specific Resistance in the Single-crystals of n-Si, Alloyed Ge. The influence of Ge-dopant on the non-uniformity of specific resistance (ρ) in n-Si- single crystals has been studied using longitudinal piezoresistance measurements, to-probe method and Hall-effect. The measurements showed small difference in $\rho = f(X)$ dependences in $n\text{-Si}\langle\text{Ge}\rangle$ samples, cut lengthways and perpendicular to the axis of growth. The specific resistance gradients obtained by two probe method differ more significantly in the mentioned directions. Detected differences are due to the uneven distribution of impurities in the growth layers of the crystals. This indicates the complexity of the distribution of inhomogeneities in the crystals due to the influence of isovalent impurities.

Key words: silicon, germanium, isovalent impurity, kinetic effects.

Стаття надійшла до редколегії
02.10.2014 р.

УДК 537.312

Юрій Коваль

Вплив дефектів радіаційного походження на електричні властивості монокристалів антимоніду кадмію

Досліджено вплив γ -опромінення на кінетичні параметри монокристалів антимоніду кадмію. Вимірювалися питома провідність та ефект Холла, що дало змогу отримати залежності сталої Холла, концентрації носіїв заряду та їх рухливості від температури. Виявлено різке збільшення значень рухливості в опроміненіх кристалах при дозах опромінення до $4 \cdot 10^{18} \gamma$ кв/см², яке пояснюється наявністю так званого «ефекту малих доз». Відзначено, що зростання рухливості носіїв заряду, спостережуване в роботі, виникає не за рахунок підвищення досконалості кристалів при їх радіаційній обробці, а як наслідок – зниження ефективності розсіяння носіїв заряду на домішкових іонних залишках при частковій нейтралізації заряду протилежним за знаком зарядом дефектів.

Ключові слова: антимонід кадмію, γ -опромінення, кінетичні параметри.