

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.058>

УДК 621.315.592.3

Г.П. Гайдар

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

Зміна електрофізичних властивостей сильно легованих монокристалів n -Ge \langle As \rangle під впливом термовідпалів

Представлено членом-кореспондентом НАН України Є. Ф. Венгером

Встановлено особливості змін електрофізичних параметрів та мікроструктури легованих домішкою миш'яку монокристалів n -Ge, які відбувалися при термовідпалах у широкому інтервалі температур. Одержані залежності концентрації та рухливості носіїв заряду від температури відпалу пояснено процесами перебудови домішкових комплексів у сильно легованих кристалах германію, вироцнених методом Чохральського.

Ключові слова: *германій, сильне легування, домішка миш'яку, концентрація носіїв заряду, рухливість носіїв заряду, термічні відпали, мікроструктура.*

Невід'ємною ланкою технології виготовлення твердотільних електронних приладів на основі багатодолинних напівпровідників є їхня термообробка в різних умовах. Взаємодія легуючих домішок з дефектами ґратки і залишковими домішками в об'ємі напівпровідникових кристалів відбувається, в принципі, при будь-якій відмінній від нуля температурі. Однак при більш високих температурах ці процеси протікають швидше [1].

При створенні приладів сучасної твердотільної електроніки одним із основних технологічних способів є легування напівпровідників необхідними домішками до потрібних концентрацій, що дозволяє направлено змінювати властивості матеріалів [2]. У реальних кристалах наявністю в об'ємі напівпровідників домішкових атомів (які, по суті, є дефектами в кристалі) та нерівномірністю їх розподілу зумовлюється існування неоднорідностей за електричними, оптичними та іншими характеристиками [3].

Інтенсивне дослідження сильно легованих напівпровідників та підвищений інтерес до них обумовлюється, переважно, двома причинами. По-перше, з використанням сильно легованих напівпровідників значно розширилися можливості напівпровідникової техніки і електроніки, оскільки вони є основою таких напівпровідникових приладів, як тунельні діоди, лазери, тензometri, датчики Холла. Другою, не менш важливою причиною, є те, що в сильно легованих напівпровідниках виникають важливі в пізнавальному відношенні якісно

нові фізичні явища, у порівнянні з досліджуваними в кристалах, які мають звичайний рівень вмісту домішки. До числа таких явищ відносяться наступні: прояви “індивідуальності” легуючих домішок в кінетичних ефектах, політропія домішки, поява “хвостів” густини станів у забороненій зоні тощо [4]. Крім того, високий вміст і пов'язаний з ним нерівномірний розподіл домішки може призводити до утворення в об'ємі кристала дефектів, які мають різну фізичну природу [5].

Перш за все, слід визначити дещо конкретніше поняття “слабо” і “сильно” легованого напівпровідника. При *слабкому легуванні* атоми домішки, які не взаємодіють один з одним, утворюють локальні енергетичні рівні у забороненій зоні, а носії струму в такому напівпровіднику підлягають класичній статистиці Больцмана.

При *збільшенні ступеня легування* хвильові функції сусідніх домішкових атомів починають перекриватися, що приводить до підвищення ефективності взаємодії між атомами домішки, яке знімає перестановочне виродження і зумовлює виникнення домішкових зон на основі рівнів, які були дискретними при слабкій взаємодії між домішковими атомами. Рівень легування, що приводить до утворення домішкової зони, умовно називають середнім.

Нарешті, при *сильному легуванні* домішкова зона зливається із зоною провідності (напівпровідник n -типу) або з валентною зоною (напівпровідник p -типу). Носії заряду, густина яких тепер дуже велика, підлягають квантовій статистиці Фермі—Дірака, а напівпровідники з таким рівнем легування називаються сильно легованими. Наприклад, питомий опір слабо легованого n -Ge не залежить суттєво від виду легуючої домішки V групи (As, P, Sb) в тій температурній області, де всі донори повністю іонізовані. Однак у випадку n -Ge, сильно легованого цими домішками, питомий опір, починаючи з деякої концентрації, істотно залежить від виду легуючої домішки [6]. Найбільший питомий опір в області високих концентрацій спостерігався для Ge (As), а найменший — для Ge (Sb). Слід також зауважити, що граничні значення концентрації, при якій починає проявлятися “індивідуальність” домішки, розрізняються для кристалів германію, легованих різними домішками.

Особливості електричних властивостей сильно легованих кристалів Ge стають певною мірою зрозумілими, якщо припустити, що концентрація носіїв заряду, визначена з холлівських вимірів, менша від істинної концентрації домішки в об'ємі досліджуваного кристала. Враховуючи те, що атоми легуючої домішки повністю іонізовані, а Холл-фактор в сильно легованому Ge не дуже сильно відрізняється від 1 (хоча і не дорівнює в точності одиниці аж до найвищих концентрацій легуючої домішки), така невідповідність може пояснюватися тим, що частина атомів легуючої домішки не входить в ґратку Ge і знаходиться в його об'ємі в неактивному стані. Ймовірно, при високому рівні легування легуюча домішка знаходиться в кристалі Ge у декількох формах одночасно. Ця властивість домішки в сильно легованому напівпровіднику називається *політропією* [5, 7, 8].

Причин виникнення політропії домішки в Ge досить багато. Основними серед них є наступні: утворення різного виду структурних комплексів, осадження легуючої домішки на різних структурних дефектах (наприклад, утворення “домішкових атмосфер” на дислокаціях), включення другої фази, а також присутність атомів домішки у міжвузлях. Усі ці причини призводять до того, що частина домішки не входить у твердий розчин заміщення. Така система з термодинамічної точки зору не є стійкою, оскільки політропія проявляється при концентраціях домішки, коли твердий розчин ще далекий від насичення. Тому природно

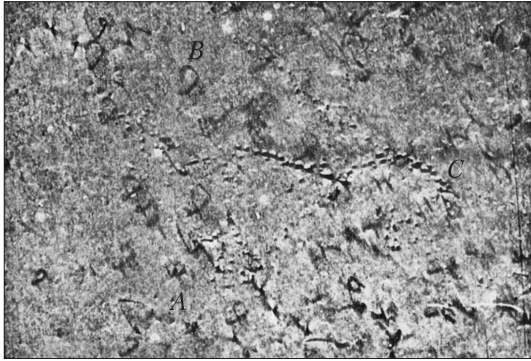


Рис. 1. Рентгенівська топограма зразків $n\text{-Ge} \langle \text{As} \rangle$ у вихідному стані (до термообробки)

припустити, що з плином часу буде відбуватися поступове відновлення твердого розчину, тобто, концентрація носіїв заряду буде зростати у зв'язку з додатковим переходом частини легуючої домішки в твердий розчин.

Вивчення розпаду твердого розчину Ge і вплив цього розпаду на кінетичні ефекти має значний науковий і практичний інтерес. Слід зауважити, що при розпаді твердого розчину домішки кристалічна ґратка основної речовини значно деформується. Домішка, яка не входить у твердий розчин заміщення і утворює (як зазначалося вище) різного роду дефекти, створює локальні порушення в кристалі. Такі порушення можна досліджувати структурними методами, що базуються на дифракції рентгенівських променів (наприклад, методом Ланга або методом аномального проходження рентгенівських променів) [9].

Останнім часом все більший інтерес викликає германій, легований миш'яком. Цей інтерес загалом обумовлений тим, що в сильно легованих кристалах Ge домішкою миш'яку явища розпаду твердого розчину відбуваються досить легко. Атоми As мають значну дифузійну рухливість у ґратці германію, що дозволяє спостерігати розпад твердого розчину домішки в широкому температурному діапазоні.

У роботах [3, 10], виконаних раніше, в яких вивчався термовідпал напівпровідникових кристалів, порівнювалися отримані дані, що були результатом відпалів, проведених при різних температурах ($T_{\text{відп}}$) і різних їх тривалостях (t), коли вихідні кристали характеризувалися звичайним рівнем вмісту домішки.

У роботах [3, 10], виконаних раніше, в яких вивчався термовідпал напівпровідникових кристалів, порівнювалися отримані дані, що були результатом відпалів, проведених при різних температурах ($T_{\text{відп}}$) і різних їх тривалостях (t), коли вихідні кристали характеризувалися звичайним рівнем вмісту домішки.

Мета даної роботи — проведення низки послідовних термовідпалів однакової тривалості в широкому інтервалі температур сильно легованих миш'яком монокристалів германію n -типу і вивчення змін їх електрофізичних і структурних характеристик, які виникають під впливом таких термовідпалів.

Досліджували зміни концентрацій носіїв заряду n_e і їх рухливостей μ у результаті термовідпалів сильно легованих монокристалів $n\text{-Ge} \langle \text{As} \rangle$ при різних температурах в інтервалі від 540 до 900 °С, а також вивчали мікроструктурні зміни вихідних і термооброблених зразків методами рентгенівської топографії та вибіркового хімічного травлення. Для цього зразки вирізали паралельно площині (111) з того самого зливка. Механічну й хімічну обробку всіх зразків проводили в однакових умовах. Концентрація легуючої домішки миш'яку для всіх зразків германію, що вивчалися, була на рівні $N_{\text{As}} \approx 3,9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Зразки досліджували у вихідному стані (визначали концентрацію носіїв заряду в їх об'ємі і рухливість), а потім піддавали термообробці у вакуумній печі при температурах 540, 600, 640, 725, 800, 830, 850 і 900 °С. Час витримки кристалів при кожній температурі складав 0,5 год. Після термообробки досліджували ті самі параметри, що й у вихідному стані, з використанням стандартної методики вимірювання ефекту Холла та електропровідності.

На рис. 1 наведено рентгенівську топограму, зняту для зразків $n\text{-Ge} \langle \text{As} \rangle$ у вихідному стані, тобто до термообробки. Вигляд цієї топограми був типовим для всіх зразків, які потім

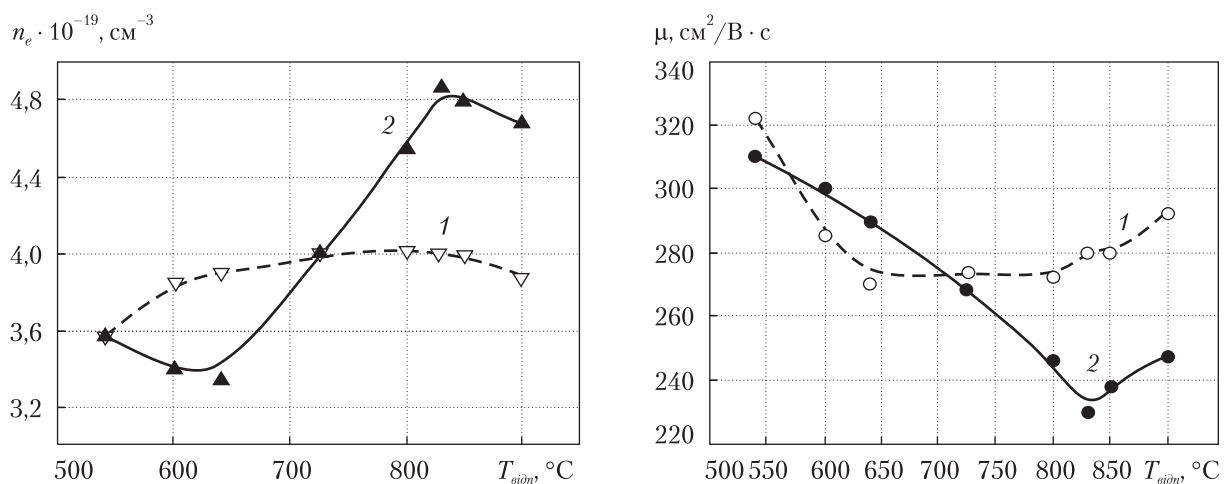


Рис. 2. Залежності концентрацій носіїв заряду n_e від температур відпалу $T_{\text{відп}}$ у сильно легованому *n*-Ge (As): 1 (∇) – зразки у вихідному стані, які підлягатимуть відпалу при відповідній $T_{\text{відп}}$; 2 (\blacktriangle) – значення n_e для тих же зразків після термообробки

Рис. 3. Залежності рухливостей носіїв заряду μ від температур відпалу $T_{\text{відп}}$ у сильно легованому *n*-Ge (As): 1 (\circ) – зразки у вихідному стані; 2 (\bullet) – значення μ для тих же зразків після термообробки

відпалювалися. На рис. 1 виявлено дислокаційні петлі діаметром до 250 нм (позначено літерою *B*). Крім цих петель на топограмі видно дислокації (позначено літерою *A*), направлені вздовж кристалографічного напрямку [111], а також сегрегати домішки (літера *C*). Аналізуючи рис. 1, можна зробити певні висновки щодо джерел дислокацій у досліджуваних зразках. Перш за все, у сильно легованих кристалах на утворення дислокацій великий вплив виявляють домішки, які випадають із твердого розчину. Крім того, при розпаді твердого розчину As в Ge виникають два види точкових дефектів: вакансії Ge і впроваджені атоми As. Скупчення точкових дефектів можуть бути джерелом дислокаційних петель [11]. Дислокації і дислокаційні петлі можуть утворюватись у кристалах, які мають у собі частинки “виділень” фази. З’являються вони для релаксації термічних напружень, що виникають при охолодженні кристала через різницю в коефіцієнтах теплового розширення і розмірах порожнини і “виділення”, яке її заповнює. Відомо [11], що дислокаційні петлі біля більш “твердих”, ніж матриця, “виділень” утворюються легше, ніж біля “м’яких”. Але в останньому випадку можливе утворення петель дислокацій під дією низьких зовнішніх напруг, наприклад, у присутності “пор” з кристалічними гранями і ребрами, радіус кривизни яких приблизно порядку міжатомного розміру. Першим кроком у генеруванні послідовності дислокаційних петель є утворення невеликої петлі на поверхні “виділення” – матриця. “Вільний” простір для “виділення” буде створюватися шляхом витіснення відповідного числа дислокаційних петель.

Таким чином, можна вважати, що у вихідному стані твердий розчин миш’яку в германії знаходився у стані розпаду, зумовленого осадженням домішки на дислокаціях, однак кристалічна ґратка при цьому, ймовірно, ще не зазнавала істотних порушень.

Результати проведених експериментів представлені на рис. 2 і 3. Причини тих змін, що виникають у залежностях n_e і μ від температур відпалів $T_{\text{відп}}$, імовірно, зводяться до

прояву низки чинників, які неминуче супроводжують зазначені термовідпали. При температурі відпалу $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ ніяких змін з n_e не відбулося у порівнянні з вихідним станом (рис. 2). У низькотемпературному інтервалі від 600 до $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ проведені електричні виміри показали, що відбувається інтенсивний розпад розчину As в Ge. Як видно з рис. 2, розпад пересиченого твердого розчину As в Ge супроводжується зменшенням концентрації носіїв заряду, оскільки частина домішки при розпаді переходить в електрично-неактивний стан. Рухливість носіїв при цьому, відповідно, збільшується, оскільки число ефективних електрично-активних розсіювачів зменшується.

Слід зауважити, що вимірювання електричних параметрів виконувалося при температурі рідкого азоту ($T_{\text{вимір}} = 77\text{ K}$). При цій температурі, якщо врахувати дуже високу концентрацію носіїв, система наближається до виродження, а Холл-фактор — до одиниці. Отже, одержані значення концентрації носіїв будуть більш точними, ніж виміряні при кімнатній температурі.

Дослідження зразків після термообробки при температурах нагріву $T_{\text{відп}} > 725\text{ }^{\circ}\text{C}$ показали, що концентрація носіїв n_e не зменшується, а збільшується у порівнянні з вихідним станом (див. рис. 2), хоча, ймовірно, явище розпаду твердого розчину при цих температурах певною мірою має місце. Така невідповідність, скоріш за все, пов'язана з тим, що при цих температурах відпалу, якщо взяти до уваги високу концентрацію домішки, утворюються електрично-активні комплекси (аж до $T_{\text{відп}} \approx 830\text{ }^{\circ}\text{C}$). Цей процес обумовлює збільшення концентрації носіїв, у результаті чого, можливо, при $725\text{ }^{\circ}\text{C}$ компенсується, а при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ перебивається зменшення концентрації носіїв за рахунок розпаду твердого розчину As в Ge. При ще більш високих температурах відпалу електрично-активні комплекси будуть розпадатися, а домішка, яка випала раніше, — повертатися у ґратку кристала, що супроводжується відновленням його структурної досконалості. У результаті цього процесу збільшується концентрація носіїв заряду і зменшується їх рухливість.

Зміна рухливості носіїв заряду, як видно із зіставлення рис. 3 і 2, добре корелює зі змінами концентрації електрично-активних комплексів (розсіюючих центрів) як на ділянці зростання n_e (а, отже, і концентрації розсіюючих центрів), так і на ділянці початку їх температурної дисоціації.

Спад рухливості носіїв у діапазоні температур відпалів від $T_{\text{відп}} \approx 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ (див. рис. 3) природно пов'язати з наростанням величини домішкового розсіювання. У цьому інтервалі температур, можливо, вводяться в кристал термічні акцептори, які компенсують легуючі домішки, що і зумовлює зростання концентрації розсіюючих центрів, а отже, забезпечує зниження рухливості носіїв заряду. Результати, одержані на зразках, термооброблених в околиці температури відпалу $\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідають, ймовірно, початковій стадії термічної дисоціації високотемпературних електрично-активних комплексів, які виявляють донорну активність, що зумовлює підвищення рухливості, яке спостерігалось в дослідях.

Сильно леговані зразки $n\text{-Ge (As)}$ досліджувалися також до та після термообробки методом вибіркового хімічного травлення. Слід зазначити, що при травленні вільної від дефектів поверхні напівпровідника вона залишається плоскою і чистою. Області з дефектами витравлюються по-різному, утворюючи ямки або горбочки. Дислокації витравлюються у вигляді ямок із вершиною, які поглиблюються зі збільшенням тривалості травлення без зміни своєї форми і морфології. Якщо дислокація не перпендикулярна до поверхні, форма

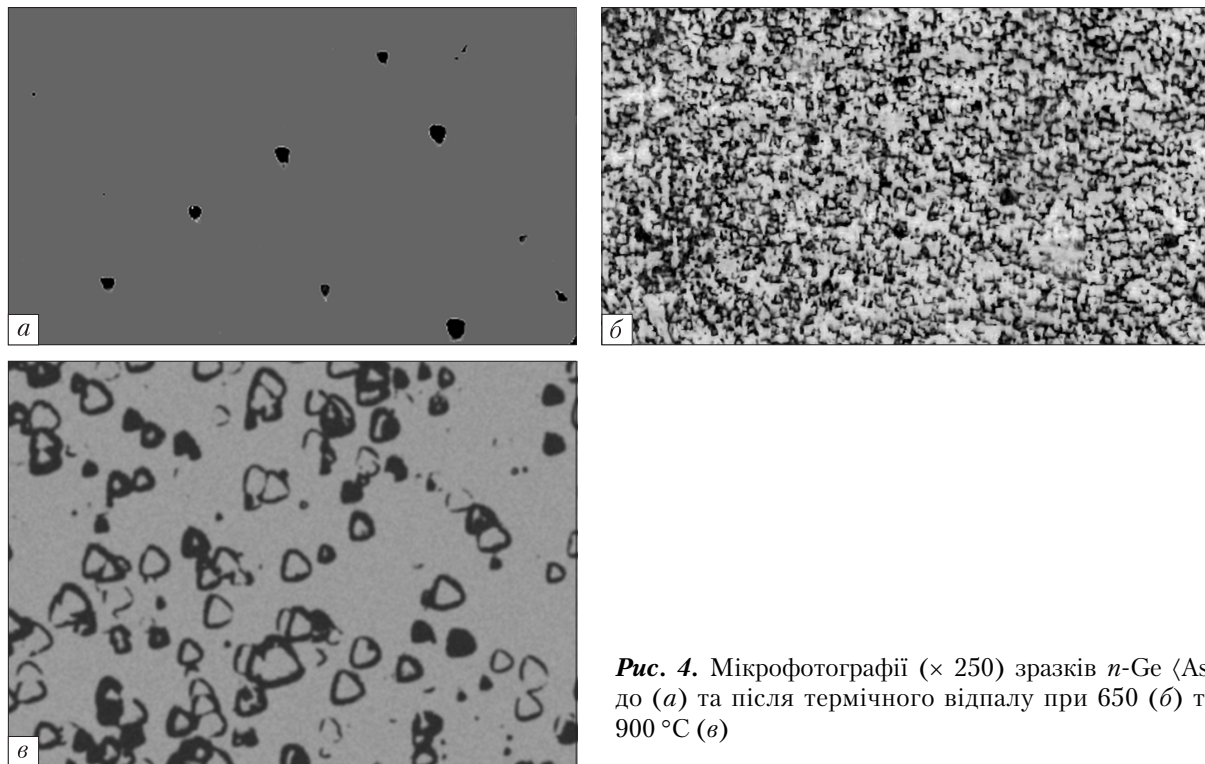


Рис. 4. Мікрофотографії ($\times 250$) зразків n -Ge (As) до (а) та після термічного відпалу при 650 (б) та 900 °С (в)

ямки буде неправильною. Взагалі, на початку травлення лінійні і локалізовані дефекти можуть бути однакової морфології, але при збільшенні тривалості травлення перші зберігають свою форму, а локалізовані — проявляють своє плоске дно. Деякі дефекти кристала виявлятимуться при травленні як горбочки. Це, зазвичай, можуть бути малі нерозчинні окисні частинки або осад, що випадає з протравлювача. Результат травлення поверхні зразка залежить від її кристалографічної орієнтації. Щільно упаковані площини, як правило, легше піддаються травленню. Форма фігур травлення також визначається типом кристалографічної площини. Ямки травлення, що пов'язані з дислокаціями, при повторному травленні кристала з'являються в тих же місцях, що виявлені раніше. Таким чином виявляються дислокації, які перетинають поверхню зразка.

При вивченні сильно легованих миш'яком зразків германію методом вибіркового травлення [12] спостерігався значний вплив розпаду твердого розчину домішки на характер і швидкість цього травлення. На рис. 4 представлено мікрофотографії кристалів, які підлягали вибіркового травленню у вихідному стані та після термообробок при 650 і 900 °С. В області інтенсивного розпаду твердого розчину (при 650 °С) на мікрофотографії з'являється велика кількість плоскодонних ямок травлення (рис. 4, б), які відсутні у вихідному стані (рис. 4, а). Зі збільшенням температури кількість ямок зменшується, а розмір їх збільшується (рис. 4, в). У зв'язку з цим можна припустити, що дефекти (дислокаційні петлі, сегрегати миш'яку чи сполук GeAs, GeAs₂), які утворюються в результаті розпаду твердого розчину, є центрами інтенсивного вибіркового травлення. Швидкість вибіркового травлення значно збільшується при підвищенні температури відпалу, про що свідчить збільшення розмірів

дислокаційних ямок. Це пов'язано, ймовірно, з тим, що дислокації, декоровані частинками випаданої домішки As або сполук GeAs, GeAs₂, піддаються травленню інтенсивніше [13, 14], ніж кристалічна ґратка.

При високотемпературному відпалі при 900 °С кількість плоскодонних ямок травлення різко зменшувалася при одночасному збільшенні їхнього розміру. Це відображає, скоріш за все, зменшення кількості центрів випадіння домішки (порушених областей ґратки) і ріст цих областей.

Таким чином, встановлено, що сильно леговані миш'яком кристали *n*-Ge, які відпалювалися при температурі 900 °С, містили меншу кількість дефектів, і ступінь їх структурної досконалості була вищою, ніж у кристалів, підданих відпалу при температурі 650 °С.

Експериментально встановлено також, що ті зміни в концентраціях і рухливостях носіїв заряду, які відбуваються при кожному відпалі, після охолодження зразків до кімнатної температури виявляються досить стійкими і можуть залишатися незмінними протягом шести місяців, тобто, дифузійні процеси в термовідпалених кристалах при підвищених температурах ($T_{\text{відп}} > 500 - 600$ °С) не зазнають помітного впливу кімнатної температури протягом тривалого часу. Це відкриває практичні можливості змінювати фізичні параметри (такі як n_e і μ) германію в бажаному напрямку (в межах змін, які забезпечуються термовідпалами при підвищених температурах) і використовувати досягнуті зміни при більш низьких (наприклад, кімнатній) температурах. При цьому, звичайно, необхідно враховувати й ті зміни (в значеннях рухливості носіїв заряду, часу вільного життя неосновних носіїв та інших параметрів), якими неодмінно супроводжуються відпали кристалів при різних температурах. Адже ці зміни можуть бути не тільки корисними, але й небажаними. Так, наприклад, якщо потрібно підвищити концентрації носіїв n_e у кристалах за рахунок відпалів, то в *n*-Ge (As) рухливості носіїв заряду будуть тільки знижуватися в актуальній для практики області температур відпалів 500–850 °С.

У тому випадку, коли проводиться серія послідовних термовідпалів на одному й тому ж зразку, при аналізі змін у значеннях n_e і μ необхідно враховувати також те, що параметри n_e і μ , отримані в результаті кожного наступного термовідпалу (в наростаючій послідовності відпалів), визначаються не значеннями цих параметрів у самому вихідному стані відпалюваного зразка (хоча і від нього вони залежать), а, по суті, являють сумарний результат тих змін у значеннях цих параметрів, які відбуваються в досліджуваному зразку після всіх попередніх термообробок, починаючи з процесу вирощування даного кристала і швидкості його охолодження при цьому.

Таким чином, у роботі на сильно легованих монокристалах *n*-Ge (As) досліджено особливості електрофізичних параметрів (n_e і μ) в умовах зміни режимів термовідпалів, які широко використовуються при виробництві напівпровідникових приладів. Після проведених термообробок зразків виявлено двоекстремівну залежність концентрації носіїв заряду n_e від монотонно підвищуваних значень температур відпалу (мінімум цієї залежності знаходиться в області ~ 630 °С, а максимум — в околиці ~ 840 °С), яка супроводжується змінами рухливості $\mu = \mu(T_{\text{відп}})$ з одним мінімумом, який розміщується в околиці ~ 830 °С. У результаті проведених досліджень виявлено інтенсивний розпад твердого розчину домішки в сильно легованому миш'яком *n*-Ge в області температур відпалу від 600 до 750 °С.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Гайдар Г.П. Кинетика электронных процессов в Si и Ge в полях внешних воздействий. LAP LAMBERT, Saarbrücken: Academic Publishing, 2015. 268 с.
2. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. Москва: Радио и связь, 1991. 258 с.
3. Баранський П.І., Федосов А.В., Гайдар Г.П. Неоднорідності напівпровідників і актуальні задачі між-дефектної взаємодії в радіаційній фізиці і нанотехнології. Київ—Луцьк: РВВ Луцького держ. техн. ун-ту, 2007. 316 с.
4. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. Москва: Наука, 1979. 416 с.
5. Фистуль В.И. Атомы легирующих примесей в полупроводниках (состояние и поведение). Москва: Изд-во физ.-матем. лит-ры, 2004. 432 с.
6. Baranskii P.I., Gaidar G.P. Features of tensorresistance in single crystals of germanium and silicon with different dopants. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2016. **19**, № 1. P. 39–43. doi: <https://doi.org/10.15407/spqeo19.01.039>
7. Вигдорович Е.Н. Политропия примеси в системе GaAs-Mn. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2014. № 3 (107). С. 3–6.
8. Критская Т.В., Скачков В.А., Панченко О.В. Политропия примеси бора в монокристаллах кремния, выращенных по методу Чохральского. Матеріали X-ої науково-технічної конф. студентів, магістрантів і викладачів. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2005. Ч. 1. С. 24.
9. Баранський П.І., Беляев О.Є., Гайдар Г.П., Кладько В.П., Кучук А.В. Проблеми діагностики реальних напівпровідникових кристалів. Київ: Наук. думка, 2014. 462 с.
10. Баранський П.І., Федосов А.В., Гайдар Г.П. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу. Луцьк: Надстир'я, 2000. 279 с.
11. Hirth, J.P., Lothe, J. Theory of Dislocations. 2nd ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 1982. 857 p.
12. Гроза А.А., Литовченко П.Г., Старчик М.І. Ефекти радіації в інфрачервоному поглинанні та структурі кремнію. Київ: Наук. думка, 2006. 124 с.
13. Павлик Б., Дідик Р., Шикоряк Й., Лис Р., Слободзян Д., Грипа А., Чегіль І. Деякі особливості хімічного травлення поверхонь монокристалічного кремнію. *Електроніка та інформаційні технології*. 2011. № 1. С. 50–59.
14. Sangval K. Etching of Crystals: Theory, Experiment, and Application. Amsterdam: North Holland. Publishing Company 1987. 497 p.

Надійшло до редакції 29.01.2018

REFERENCES

1. Gaidar, G.P. (2015). The Kinetics of Electronic Processes in Si and Ge in the Fields of External Influences. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing (in Russian).
2. Gotra, Z.Yu. (1991). Technology of Microelectronic Devices. Handbook. Moscow: Radio i svyaz' (in Russian).
3. Baranskii, P.I., Fedosov, A.V. & Gaidar, G.P. (2007). Heterogeneities of Semiconductors and Urgent Problems of the Interdefect Interaction in the Radiation Physics and Nanotechnology. Kiev—Lutsk: Lutsk State Technical Univ. (in Ukrainian).
4. Shklovskiy, B.I. & Efros, A.L. (1979). Electronic Properties of Doped Semiconductors. Moscow: Nauka (in Russian).
5. Fistul', V.I. (2004). Atoms of Alloying Impurities in Semiconductors (State and Behaviour). Moscow: Publishing house of physical and mathematical literature (in Russian).
6. Baranskii, P.I. & Gaidar, G.P. (2016). Features of tensorresistance in single crystals of germanium and silicon with different dopants. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 19, No. 1, pp. 39–43. doi: <https://doi.org/10.15407/spqeo19.01.039>
7. Vigdorovich, E.N. (2014). Polyropy of Impurity in GaAs-Mn System. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika*. No. 3 (107), pp. 3–6 (in Russian).
8. Kritskaya, T.V., Skachkov, V.A. & Panchenko, O.V. (2005). Polyropy of boron impurity in single crystals of silicon grown by the Czochralski method. Proc. of the Xth Sci.-Technical Conf. of the Students, Graduate

- Students and Lecturers of Zaporizhia State Engineering Academy (ZSEA). Zaporizhzhya: EPD ZSEA. Part 1, p. 24 (in Russian).
9. Baranskii, P.I., Belyaev, O.Ye., Gaidar, G.P., Klad'ko, V.P. & Kuchuk, A.V. (2014). Problems of Diagnostics of Real Semiconductor Crystals. Kiev: Naukova Dumka (in Ukrainian).
 10. Baranskii, P.I., Fedosov A.V. & Gaidar, G.P. (2000). Physical Properties of Silicon and Germanium Crystals in the Fields of Effective External Influence. Lutsk: Nadstyr'ya (in Ukrainian).
 11. Hirth, J.P. & Lothe, J. (1982). Theory of Dislocations. 2nd ed. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company.
 12. Groza, A.A., Litovchenko, P.G. & Starchyk, M.I. (2006). Effects of Radiation in the Infrared Absorption and Structure of Silicon. Kiev: Naukova Dumka (in Ukrainian).
 13. Pavlyk, B., Didyk, R., Shykoriak, Y., Lys R., Slobodzian, D., Grypa, A. & Chehil', I. (2011). Some features of the chemical etching of monocrystalline silicon surfaces. Electronics and information technologies, No. 1, pp. 50-59 (in Ukrainian).
 14. Sangval, K. (1987). Etching of Crystals: Theory, Experiment, and Application. Netherlands, Amsterdam: North Holland Publishing Company.

Received 29.01.2018

Г.П. Гайдар

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев
E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ n -Ge \langle As \rangle
ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕРМОТЖИГОВ

Установлены особенности изменений электрофизических параметров и микроструктуры легированных примесью мышьяка монокристаллов n -Ge, которые происходили при термоотжигах в широком интервале температур. Полученные зависимости концентрации и подвижности носителей заряда от температуры отжига объяснено процессами перестройки примесных комплексов в сильно легированных кристаллах германия, выращенных методом Чохральского.

Ключевые слова: германий, сильное легирование, примесь мышьяка, концентрация носителей заряда, подвижность носителей заряда, термические отжиги, микроструктура.

G.P. Gaidar

Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

VARIATIONS IN ELECTROPHYSICAL PROPERTIES
OF HEAVILY DOPED SINGLE CRYSTALS OF n -Ge \langle As \rangle
UNDER THE EFFECT OF THERMAL ANNEALINGS

Specific features of variations in the electrophysical parameters and microstructure of n -Ge single crystals doped with the arsenic impurity that occur during thermal annealings in a wide temperature range are established. The obtained dependences of the concentration and mobility of charge carriers on the annealing temperature are explained by the processes of restructuring of impurity complexes in the strongly doped germanium crystals grown by the Czochralski method.

Keywords: germanium, heavy doping, arsenic impurity, charge carrier concentration, charge carrier mobility, thermal annealings, microstructure.