

атомів кремнію та германію. Існування полів внутрішніх напружень у $n\text{-Si}\langle\text{Ge}\rangle$ також експериментально виявили автори інших робіт за допомогою тензочутливих 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 кремния. 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 Yuri. 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 опромінених 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.

Постановка наукової проблеми та її значення. Опромінення частинками високих енергій – це потужний і добре контрольований метод керування ступенем впорядкованості у твердих тілах. В результаті опромінення виникають стійкі зміни градієнтів питомого опору внаслідок змін концентрації та рухливості носіїв заряду, зумовлених вторинними радіаційними дефектами [1].

Особливістю власних дефектів ґратки монокристалів CdSb є активна взаємодія їх з легуючими і неконтрольованими домішками [2]. Оскільки технологія вирощування цього типу напівпровідників ще недосконала, то при невеликих дозах опромінення введені радіацією дефекти утворюватимуть з неконтрольованими домішками різні комплекси, що значно ускладнює одержання інформації про роль власних дефектів ґратки при визначенні фізичних властивостей напівпровідників CdSb. При великих дозах опромінення концентрація радіаційних дефектів перевищуватиме концентрацію неконтрольованих домішок і роль власних радіаційних дефектів у визначенні фізичних властивостей напівпровідника стає домінуючою.

Мета роботи – експериментально дослідити вплив γ -опромінення на кінетичні параметри монокристалів антимоніду кадмію. **Завдання** – отримати температурні залежності сталої Холла, концентрації та рухливості носіїв заряду в неопромінених й опромінених зразках CdSb.

Методика і техніка експерименту. У цій роботі досліджено спеціально нелеговані і леговані телуром та індієм монокристали антимоніду кадмію до і після γ -опромінення ^{60}Co . Досліджувані кристали сколювалися або вирізалися у вигляді паралелепіпедів з лінійними розмірами $0,1 \times 0,1 \times 1 \text{ см}^3$. Електричне поле прикладалося вздовж кристалографічного напрямку [010]. Перед вимірюваннями кристали полірувалися мікронною алмазною пастою і травилися у травнику – суміші концентрованих H_2O_2 , HF (70%), HCl і гліцерину (10:3:1:6). Це здійснювалось для зняття приповерхневого шару, який в багатьох випадках міг впливати на результати об'ємних досліджень [3].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. В ході досліджень отримано температурні залежності концентрації вільних носіїв заряду і сталої Холла в неопромінених й опромінених зразках CdSb (рис. 1, 2).

До опромінення нелеговані кристали CdSb за рахунок мілких акцепторів з $E_1 = 3,65 \times 10^{-3} \text{ eV}$ і $E_2 = 6,2 \times 10^{-3} \text{ eV}$, зв'язаних з вакансіями кадмію (V_{Cd}) [2], мали p -тип провідності (крива 1 рис. 1). γ -опромінення нелегованих кристалів p -CdSb ($\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$) не зумовлює при $T = 291 \text{ K}$ до конверсії типу провідності (крива 1' рис. 1), але концентрація дірок при цьому зменшується майже на порядок і досягає значення $7 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При такій концентрації вільних носіїв питома провідність кристалів мало відрізняється від власної.

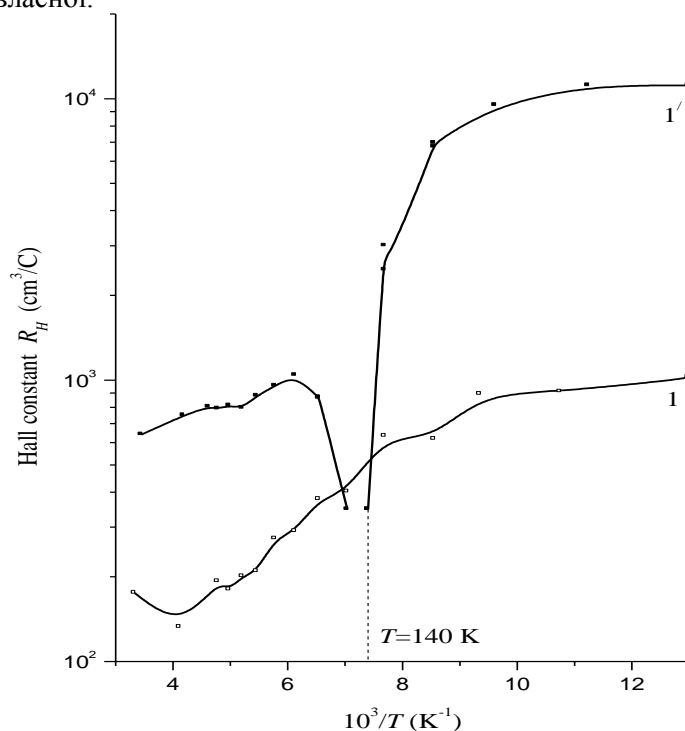


Рис. 1. Температурна залежність сталої Холла в спеціально нелегованому p -CdSb: 1 – неопроміненому; 1' – опроміненому γ -квантами ^{60}Co ($\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$)

Донорні домішки, зокрема телур, активно взаємодіють з V_{Cd} . Леговані телуrom до концентрації $7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ кристали $CdSb\langle Te \rangle$ мають концентрацією електронів провідності при $T = 291 \text{ K}$ $n \approx 7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (крива 2 рис. 2). Температурні показники кривої 2 різко відрізняються від аналогічної кривої 1 для $p\text{-CdSb}$ (рис. 2), що не містить телур.

Експоненціальний характер залежності 2 рисунка 2 показав, що при легуванні телуrom монокристалів $p\text{-CdSb}$ утворюються дефекти донорного типу з енергією іонізації (визначеною з цієї залежності), рівною $E_C - 0,12 \text{ eV}$. В результаті γ -опромінення дозами порядку 10^{18} см^{-2} концентрація електронів зростає до $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ і на температурній залежності проявляється глибокий рівень $E_C - 0,16 \text{ eV}$ радіаційних дефектів (крива 2' рис. 2).

Слід відзначити, що автори [4] також спостерігали введення донорів з $E_C - 0,16 \text{ eV}$, але при нейтронному опроміненні $p\text{-CdSb}$. Тому можна зробити висновок, що за донори з енергетичними рівнями $E_C - 0,16 \text{ eV}$, які вводяться незалежно від виду опромінення і типу легуючих домішок, відповідальні власні дефекти ґратки. Такими дефектами можуть бути міжвузлові атоми кадмію (Cd_i), вакансії сурми (V_{Sb}), або комплекси з неконтрольованих домішок і вакансій. Атоми Cd дуже рухливі [2] і при невеликому збільшенні температури (до $100 \text{ }^\circ\text{C}$), що спостерігається при опроміненні (особливо нейтронному), виходять на поверхню й інші стоки, утворюють скупчення або рекомбінують з V_{Cd} .

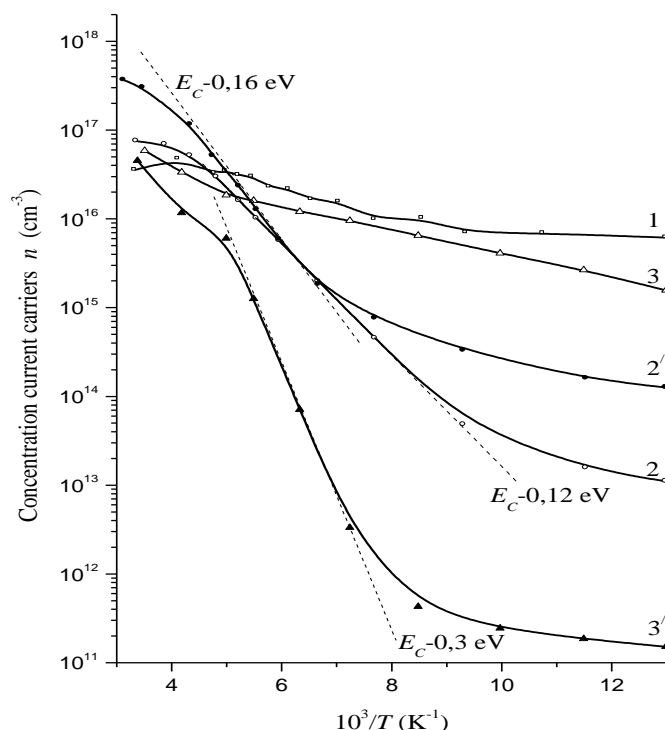


Рис. 2. Температурна залежність концентрації носіїв заряду в неопроміненому (1–3) та опроміненому γ -квантами ^{60}Co (2'–3') $CdSb$: 1 – спеціально нелегований $p\text{-CdSb}$; 2, 2' – $CdSb\langle Te \rangle$ до та після γ -опромінення ^{60}Co ($\Phi = 10^{18} \text{ см}^{-2}$); 3, 3' – $CdSb\langle In \rangle$ до та після γ -опромінення ^{60}Co ($\Phi = 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$)

Практично не змінюється концентрація після γ -опромінення при кімнатній температурі в $CdSb\langle In \rangle$ (залежності 3 та 3' рис. 2), проте при азотних температурах концентрація носіїв заряду після γ -опромінення різко зменшується (залежність 3' рис. 2), тобто відбувається видалення електронів із зони провідності, що спричиняється, згідно із [1], утворенням радіаційних дефектів з глибокими рівнями в забороненій зоні кристала. З аналізу температурних залежностей концентрації носіїв заряду $n = f(10^3/T)$ в опроміненіх кристалах $CdSb\langle In \rangle$ знайдено, що за видалення носіїв відповідає енергетичний рівень $E_C - 0,3 \text{ eV}$.

Отримані експериментальні результати можна пояснити так: опромінення γ -квантами монокристалів $p\text{-CdSb}$ зумовлює утворення донорів, які компенсують вихідні та новоутворені акцептори і, відповідно, зменшують концентрацію дірок. Але концентрації радіаційно утворених донорів недостатньо, щоб змінити тип провідності, як це спостерігаємо при легуванні телуrom та нейтронному опроміненні [4].

У ділянці $T = 140$ К відбувається зміна знака сталої Холла в γ -проміненіх спеціально нелегованих зразках (крива 1' рис. 1). Слід відзначити, що інверсію сталої Холла (в близькій до нашої ділянки) спостерігали й інші автори [3], але в неопромінену CdSb n -типу провідності. Інверсію зафіксовано лише в тих зразках, поверхня яких при обробці дотикалася до води. Це явище пояснювалось впливом на електричні властивості кристала приповерхневих областей, які при обробці адсорбують O_2 і H_2O . У випадку γ -опроміненіх кристалів інверсія типу провідності спостерігалась незалежно від виду обробки поверхні зразка, в тому числі і при сколюванні та шліфуванні алмазною пастою без контакту з водою. Очевидно, механізм інверсії знака провідності в γ -опроміненіх кристалах має не поверхневу, а об'ємну природу. Це можна пояснити, якщо врахувати, що у випадку невідродженого напівпровідника в слабких магнітних полях (умови, які виконувались у наших експериментах) постійна Холла визначається згідно із [2]:

$$R_H = r \frac{1}{e} \times \frac{p - b^2 n}{(p + bn)^2}, \quad (1)$$

де r залежить від механізму розсіювання і за порядком величини (як вважають автори роботи [5]) дорівнює 1; n і p – концентрації електронів і дірок відповідно; $b = \mu_n/\mu_p$ (μ_n і μ_p – рухливості електронів і дірок).

Як відомо, уздовж напрямку [010], що відповідало умовам наших експериментів, $\mu_p < \mu_n$ [2] і b^2 у формулі (1) набуває значення $b^2 > 1$. Тут R_H змінює знак, коли:

$$p < b^2 n, \quad (2)$$

хоча при цьому концентрація дірок може бути більшою, ніж концентрація електронів.

Провідність опроміненіх γ -квантами монокристалів p -CdSb, наближена до власної з невеликою різницею між концентраціями дірок та електронів. Достатньо незначно зменшити концентрацію дірок при зниженні температури (наприклад, внаслідок виходу їх на акцептори, які зв'язані з неконтрольованими домішками тощо), щоб змогла виконуватись умова (2), при якій відбувається конверсія знака R_H , що, очевидно, спостерігалось в проведених експериментах. Можливо, також, що зі зниженням температури, внаслідок різної температурної залежності рухливостей електронів і дірок, може зростати значення b у рівнянні (1), тобто виконання при певних температурах умови (2).

На рис. 3 наведено температурні залежності холлівської рухливості носіїв заряду в неопроміненіх й опроміненіх монокристалах CdSb.

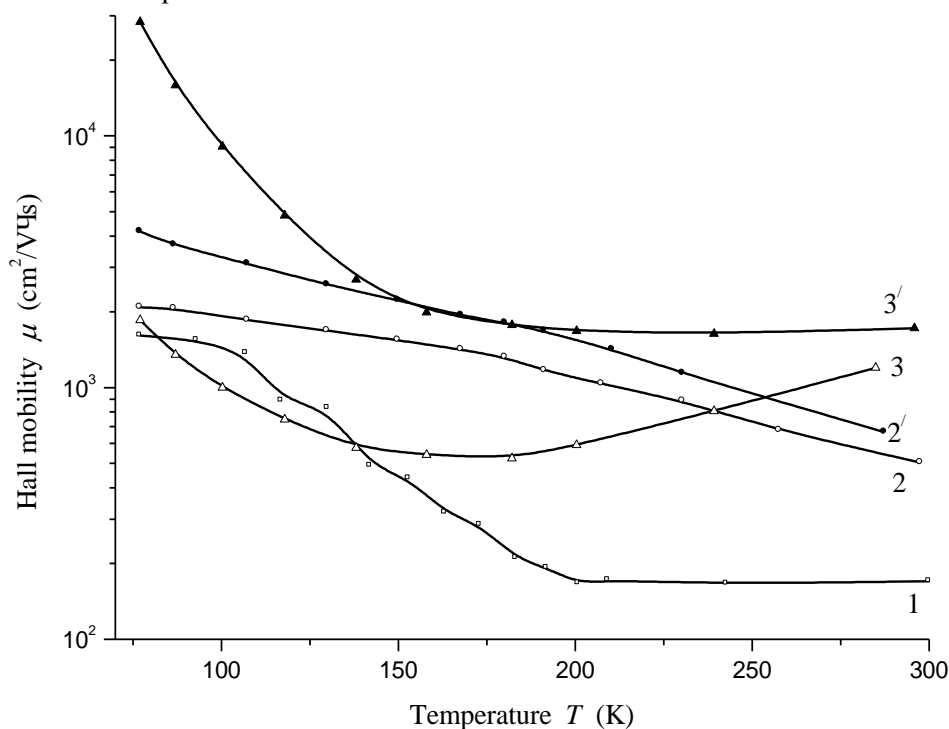


Рис. 3. Температурна залежність холлівської рухливості носіїв заряду в неопромінену (1–3) та опромінену γ -квантами ^{60}Co (2'–3') CdSb: 1 – спеціально нелегований p -CdSb; 2, 2' – CdSb<Te> до та після γ -опромінення ^{60}Co ($\Phi = 10^{18} \text{ cm}^{-2}$); 3, 3' – CdSb<In> до та після γ -опромінення ^{60}Co ($\Phi = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$)

При температурах, наближених до кімнатної, для неопромінених зразків р-CdSb (крива 1 рис. 3) температурна залежність рухливості описується законом:

$$\mu_p \propto T^{-\chi}, \quad (3)$$

де $\chi \leq 1,5$, що характерно для розсіювання дірок на теплових коливаннях ґратки [2]. При більш низьких температурах помітний вклад у розсіювання дірок створюють заряди мілких іонізованих акцепторів.

Якби рухливість електронів в опромінених кристалах при високих температурах визначалася тільки розсіюванням їх на фонах ґратки, то вона була б більшою від рухливості дірок у неопромінених зразках (для напрямку [010] в 1,76 разу [2]). Тому, очевидно, що рухливість електронів в опромінених кристалах CdSb в області високих і, тим більше, низьких температур визначається розсіюванням їх на компенсованих (заряджених) акцепторах й іонізованих донорах, концентрація яких після опромінення значно зростає. При цьому рухливість електронів залежить від концентрації заряджених центрів розсіювання N і може бути виражена формулою:

$$\mu_n \propto \frac{1}{N} T^{-\frac{3}{2}}. \quad (4)$$

У частково компенсованому напівпровіднику n -типу провідності (при $n > p$) практично всі акцептори заповнені електронами ($N_a^- = N_a$). Тому, як бачимо з умови електронейтральності (в області температур, у якій донори іонізовані), концентрація всіх центрів розсіювання визначатиметься:

$$N = N_d^+ + N_a^- = 2N_a + n. \quad (5)$$

Підставляючи (5) в (4), одержимо:

$$\mu_n \propto \frac{1}{2N_a + n} T^{-\frac{3}{2}}. \quad (6)$$

Використовуючи формулу (6), можна пояснити збільшення рухливості електронів у легованих й опромінених зразках зі зниженням температури. Дійсно, при зниженні температури концентрація електронів зменшується за експоненціальним законом (рис. 2), що і зумовлює збільшення рухливості електронів. При $T < 150$ К подальше зниження температури практично не впливатиме на концентрацію заряджених розсіювальних центрів. Невелику зміну рухливості μ_n в інтервалі $200 \div 77$ К (рис. 3), очевидно, можна пояснити домінуванням розсіювання електронів на полях механічних напружень, створених радіаційними дефектами. При такому виді розсіювання μ_n мало залежить від температури [6].

Автори [7] сформулювали припущення, що будь-які порушення ґратки (що виникають, наприклад, при γ -опроміненні), які зумовлюють виникнення точкових центрів протилежної зарядності (щодо іонних залишків) у межах взаємодії кулонівських перерізів розсіяння розглядуваних центрів, мають призводити до зростання рухливості. Відповідно, спостережуване в нашому дослідженні збільшення рухливості носіїв заряду можна пов'язати з радіаційним введенням акцепторних (від'ємно заряджених) центрів «нейтралізації», які генеруються поблизу додатньо заряджених іонів домішки In, де імовірність їх виникнення вища з огляду на мікроскопічні механічні напруження ґратки поблизу домішкових центрів, в результаті чого і відбувається часткова нейтралізація іонів домішки, що й призводить урешті-решт до зниження резерфордівського розсіяння на частково нейтралізованих центрах.

Крім того, слід відзначити факт щодо незначних змін μ зі збільшенням дози γ -опромінення при кімнатній температурі порівняно зі зміною μ при 77 К (відповідні точки на кривих 3 і 3' рис. 3). Така поведінка, цілком можливо, пояснюється тим, що при більш високих температурах радіаційні дефекти іонізовані та практично не створюють нейтралізаційного впливу на іони домішки.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Отже, аналізуючи сказане вище, можна зробити висновок, що радіаційні центри, введенні в кристал при його опроміненні, і при кімнатній, і при азотній температурах, частково «нейтралізують» заряд іонів домішки, що локалізовані у вузлах ґратки. При чому для температур рідкого азоту цей процес відбувається більш інтенсивно, ніж для кімнатних.

Слід також зауважити, що спостережуване збільшення рухливості носіїв заряду виникає не за рахунок підвищення досконалості кристалів при їх радіаційній обробці, а саме через зниження ефективності розсіяння носіїв заряду на домішкових іонних залишках при частковій нейтралізації їх заряду протилежним за знаком зарядом радіаційних дефектів.

Подані вище результати вкотре показують, що утворені внаслідок опромінення радіаційні дефекти в досліджуваних монокристалах CdSb відіграють важливу роль у формуванні їх електричних властивостей. Вивчення цих особливостей створює передумови для врахування описаних ефектів при конструюванні різних напівпровідникових приладів, а також забезпечить реальні способи мінімізації проявів цих ефектів там, де вони небажані.

Джерела та література

1. Семенюк А. К. Радіаційні ефекти в багатодолинних напівпровідниках / А. К. Семенюк. – Луцьк : Надстир'я, 2001. – 323 с.
2. Полупроводниковые соединения A^2B^5 / В. Б. Лазарев, В. Я. Шевченко, Я. Х. Гринберг, В. В. Соболев. – М. : Наука, 1978. – 256 с.
3. Влияние адсорбции на электрические свойства CdSb / Т. С. Гертович, В. Г. Никулина, А. Ф. Семизоров и др. // Физическая электроника. – 1973. – № 6. – С. 52–58.
4. Влияние радиационных дефектов на некоторые электрические и оптические свойства монокристаллов антимида кадмия / С. А. Федосов, Г. Е. Давидюк, В. В. Божко и др. // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32, № 11. – С. 1333–1337.
5. Зарубін Л. І. Електричні властивості CdSb, легованого Au при низьких температурах / Л. І. Зарубін, О. Г. Міселюк // Укр. фіз. журн. – 1967. – Т. 12, № 4. – С. 607–612.
6. Емцев В. В. О возможном механизме рассеяния носителей заряда в германии с точечными дефектами / В. В. Емцев, М. И. Клигер, Т. В. Машовец // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19. – С. 575–579.
7. Баранський П. І. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу / П. І. Баранський, А. В. Федосов, Г. П. Гайдар. – Луцьк : Надстир'я, 2000. – 280 с.

Коваль Юрий. Влияние дефектов радиационного происхождения на электрические свойства монокристаллов антимида кадмия. Исследовано влияние γ -облучения на кинетические параметры монокристаллов антимида кадмия. Измерялись удельная проводимость и эффект Холла, что позволило получить зависимости постоянной Холла, концентрации носителей заряда и их подвижности от температуры. Обнаружено факт резкого увеличения значений подвижности носителей заряда в облученных кристаллах при дозах облучения до $4 \cdot 10^{18} \gamma$ кв/см², которое объясняется наличием так называемого «эффекта малых доз». Отмечено, что увеличение подвижности носителей заряда, наблюдаемое в данной работе, возникает не за счет повышения упорядоченности кристаллов при их радиационной обработке, а за счет снижения эффективности рассеяния носителей заряда на ионных остатках примеси при частичной нейтрализации заряда противоположным по знаку зарядом дефектов.

Ключевые слова: антимида кадмия, γ -облучение, кинетические параметры.

Koval Yurii. The Influence of Radiation-induced Defects on the Electrical Properties of Cadmium Antimony Monocrystals. Influence of γ -irradiation on the kinetic parameters of cadmium antimony monocrystals has been explored. Conductivity and Hall effect have been measured, that allowed to get temperature dependences of Hall constant, concentration of charge transmitters and their mobility. The sharp increase of transmitters mobility in the crystals, exposed to the γ -irradiation at the doses up to $4 \cdot 10^{18} \gamma$ -quantum/cm², has been discovered. We explain this fact by the presence of the so-called «effect of small doses». It is marked, that the increase of charge transmitters mobility, observed in this work, arises up not due to the increase of ordering of crystals after their radiation treatment, but due to the decline of efficiency of dispersion of charge transmitters on ionic residues of admixture during partial neutralization of charge by the opposite charge of defects.

Key words: cadmium antimony, γ -irradiation, kinetic parameters.

Стаття надійшла до редколегії
02.10.2014 р.

УДК 519.711:616.12

Дмитрий Кунашев

Разработка метода автоматической классификации клеток

Статья посвящена решению одной из главных проблем диагностики и классификации (распределения) здоровых и раковых клеток. Материалом исследования выступили 1346 изображений клеток молочной железы

© Кунашев Д., 2014