

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСАШЕВЧЕНКА
ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

проф. Валерій Антонович Скришевський

Протокол №_____засідання кафедри

від “_____” _____2020 р.

**Дослідження рухливості вільних дірок у приповерхневих
каналах германію методом струму Холла**

Випускна кваліфікаційна робота магістра
спеціальності 105 Прикладна фізика та
наноматеріали

Чобітько Олександра Іванівна

Науковий керівник:

с.н.с., к.ф.-м.н. **Лисоченко Сергій Васильович**

Оцінка захисту роботи

Київ 2020 р.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 38 сторінок, 14 рисунків, 20 літературних джерел.

У роботі визначені основні електрофізичні характеристики (рухливість, концентрація, провідність) приповерхневих провідних каналів виникаючих при опроміненні германію протонами високих енергій $E=1,5\text{Мев}$. У якості метода дослідження вибрано метод струму Холла, що має ряд переваг перед традиційним методом ЕРС Холла. Виміри проведені при температурі 77К. Показано, що рухливість вільних дірок в приповерхневих каналах германію виміряна цими двома холівськими методами співпадає з точністю до похибки експерименту і приблизно дорівнює $(1-2)\text{T}^{-1}$. Такі величини рухливості дірок близькі до тих, що спостерігається у чистих довершених кристалах ($\approx 4\text{T}^{-1}$ при 77К). Висловлено ряд можливих пояснень існуванню таких високих значень рухливості в кристалах опроміненіх значними дозами протонів високих енергій (до 10^{17}см^{-2}) і відповідно модифікованою структурою (висока концентрація дефектів по Френкелю). Для проведення подальших досліджень розроблена й перевірена методика відновлення зразків (зняття опроміненого модифікованого шару травленням). Розглянуті різні методи травлення. Виходячи з характеристик кожного методу був вибраний метод хімічного травлення в пергідролевому травнику, що являє собою суміш пероксиду водню H_2O_2 з водою в різних концентраціях. Для оновлення зразків германію була вибрана концентрація перекису водню до 30%. Проведене експериментальне визначення швидкості травлення германію у пергідролевому травнику, що дорівнювала 1мкм за 20с. Визначена необхідна тривалість травлення для зняття приповерхневого шару зразка германію опроміненого протонами або α -частинками високих енергій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГЕРМАНІЙ, ПРОТОНИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ, ПРИХОВАНІ ПРОВІДНІ КАНАЛИ, РУХЛИВІСТЬ, ТРАВЛЕННЯ ГЕРМАНІЮ.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. Огляд літератури	6
1.1 Ефект Холла в напівпровідниках	6
1.1.1 Вимірювання методом ЕРС Холла	6
1.1.2 Вимірювання методом струму Холла	8
1.2 Установа, Київський ядерний мікрозонд	9
1.3 Нові технології, що базуються на методиці опромінення зразка високоенергетичними іонами.	10
2 Експериментальна частина	11
2.1 Підготовка й конструкція зразків	11
2.2 Проведення імплантації іонів водню.	12
2.3 Установа для низькотемпературних вимірювань методом струму Холла	16
2.3.1 Принципова схема вимірювань струму Холла	16
2.3.2 Блок - схема установки	17
2.4 Експериментальні результати і їх обговорення	19
2.4.1 Провідність каналів	19
2.4.2 Рухливість вільних дірок у каналах	22
2.4.3 Концентрація вільних дірок в каналах	24
2.4.4 Обговорення отриманих результатів.	25
ВИСНОВКИ	27
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	28
ДОДАТОК А	31

ВСТУП

В попередніх дослідженнях [1-4] було показано, що бомбардування зразків германію іонами високих енергій призводить до появи провідного приповерхневого каналу з високою провідністю до $10^{-2} \text{ Ом}^{-1}/\square$ і високими значеннями рухливості, що наближалися до значень рухливості в монокристалах при температурі 77К. У подальших роботах цих авторів було визначено, що провідність приповерхневого каналу можна змінювати в широкому діапазоні від $0,01 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ до $100 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ [4] при зміні дози імплантації від 10^{12} р/см^2 до 10^{16} р/см^2 . Висока рухливість, можливість змінювати провідність зразка в широких межах, поряд з усіма можливостями технології RBW, дозволяють стверджувати про перспективність застосування такої обробки германію для застосування у мікроелектроніці. Також, відмітимо, перспективність застосування германію у структурах напівпровідник на ізоляторі (ННІ), що є надзвичайно важливими й перспективними для сучасної мікроелектроніки. Створення інтегральних схем на таких структурах дає можливість забезпечити підвищення їх швидкодії, зниження робочих напруг, розширення температурного діапазону функціонування, надійності й радіаційної стійкості [6-8]. Одними з основних вимог до напівпровідника, що використовується у ННІ-структурах є висока рухливість носіїв при їх концентрації до 10^{18} см^{-3} і вище. Саме з цієї причини, останнім часом і почали використовувати германій замість кремнію [9,10].

Наведені характеристики модифікованих легкими іонами провідних каналів в германії свідчать про актуальність досліджень обробки германію легкими іонами. У руслі проведення таких досліджень, для підтвердження (або спростування) наявності високих значень рухливості, що наближалися до значень рухливості в монокристалах при температурі 77К, необхідним було проведення вимірів рухливості дірок у модифікованому германії альтернативним методом.

Тому метою даної роботи, було продовження досліджень провідних каналів, що утворюються у германії при бомбардуванні легкими іонами високих енергій методом струму Холла. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. Розглянути два холівських методи (ЕРС Холла і струму Холла) вимірювань електрофізичних характеристик провідних каналів у модифікованому германії.

2. Створити експериментальну установку для вимірювань електрофізичних характеристик методом струму Холла.

3. Створити карту опромінення зразка протонами високих енергій.

4. Провести виміри рухливості на зразку методом струму Холла.

5. Порівняти дані отримані двома холівськими методами й зробити висновки.

Оскільки при проведенні досліджень різними методами бажано їх проведення на зразках з максимально близькими параметрами, то для проведення подальших досліджень було також поставлено завдання відновлення зразків після проведених експериментів. Для цього потрібно було зробити:

1. Розглянути можливості різних методів травлення для зняття тонких шарів напівпровідників.

2. Вибрати метод травлення.

3. Визначити швидкість травлення обраним методом.

4. Провести пробні вимірювання провідності відновленого зразка.

1. Огляд літератури

1.1 Ефект Холла в напівпровідниках

При спільній дії на провідник схрещених електричного й магнітного полів у ньому, внаслідок накопичення зарядів на бокових гранях зразка, виникає додаткове холівське електричне поле E_y направлене перпендикулярно струму I_x і вектору магнітної індукції B (рис.1). Це явище і називають ефектом Холла.

На практиці рухливість вільних носіїв заряду в напівпровідниках найчастіше вимірюється саме за допомогою ефекту Холла. Результат вимірювання називається холівською рухливістю і позначається μ_h .

1.1.1 Вимірювання методом ЕРС Холла

Розглянемо напівпровідниковий зразок з прямокутним перерізом, як показано на рис. 1, струм тече в напрямку x , а магнітне поле B прикладене в напрямку z .

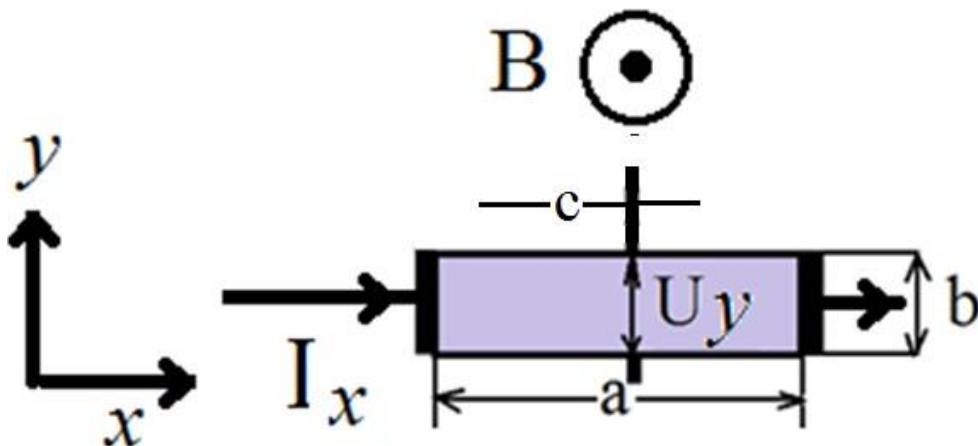


Рис. 1. Виникнення холівської ЕРС.

Виникаюча сила Лоренца відхилить електрони у напрямку (y) (матеріали n -типу) або дірки (матеріали p -типу) у напрямку ($-y$), і створить електричне поле E_y . У результаті виникає напруга в зразку, яку можна виміряти за допомогою вольтметра з високим опором. Ця напруга U_y називається напругою Холла. Її полярність має протилежні значення для матеріалів n -типу та p -типу.

Розрахувати величину рухливості μ_h можна з формули для сили Лоренца:

$$F_L = e[Bv] \quad (1)$$

де I_x - струм через зразок, v - швидкість вільних носіїв заряду.

Враховуючи, що $F = e \frac{U_y}{b}$ і $v = e \frac{U_x}{a}$ отримуємо:

$$e \frac{U_y}{b} = eB\mu \frac{U_x}{a} \quad (2)$$

де U_x - напруга на зразку.

Після скорочень з формули (2) зразу отримуємо вираз для рухливості:

$$\mu = \frac{a}{b} \frac{U_y}{B U_x} \quad (3)$$

Потім, враховуючи, що величина питомої провідності $\sigma = e\mu\Gamma = \frac{a}{b} \frac{I_x}{U_y}$

отримуємо формулу для концентрації Γ в розрахунку на одиницю площі:

$$\Gamma = \frac{\sigma}{e\mu} = \frac{1}{e} B \frac{I_x}{U_y} \quad (4)$$

Для обчислення провідності й концентрації у розрахунку на одиницю об'єму напівпровідника, потрібно їх значення поділити на величину w зразка в напрямі Z .

Для коректних вимірювань на досліді потрібно виконати необхідні співвідношення між розмірами зразка $a \gg b$ і $b \gg c$. На досліді вимірюються величини U_x , I_x , U_y і B . Для уникнення похибок внаслідок нееквіпотенціальності холівських контактів величина U_y вимірюється при двох протилежних напрямках магнітного поля \mathbf{B} , а при розрахунках усереднюється.

1.1.2 Вимірювання методом струму Холла

Вимірювання методом струму Холла виконують на зразках дуальних до зразків призначених для вимірювань методом ЕРС Холла.

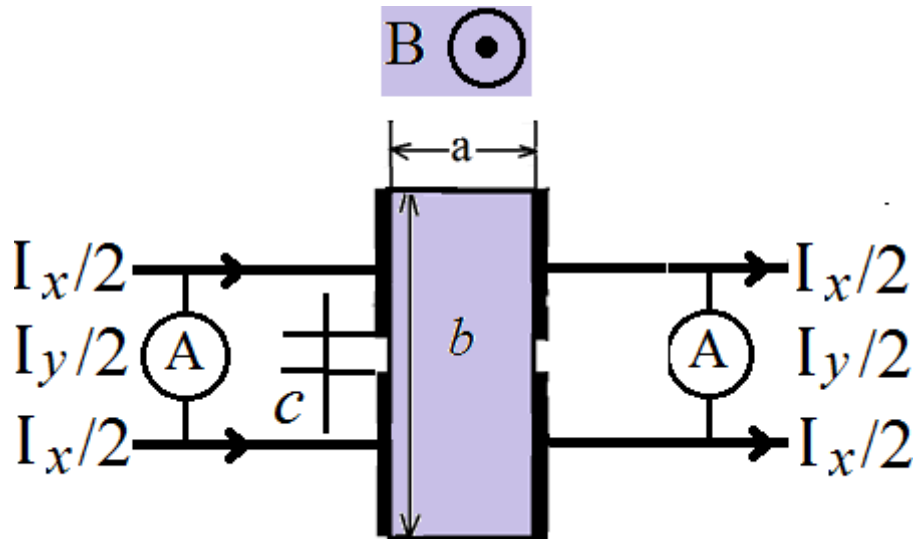


Рис. 2. Вимірювання методом струму Холла.

Протікання струмів у напівпровідниковому зразку з прямокутним перерізом показано на рис. 2. Позначення та напрямки протікання струму провідності й прикладеного магнітного поля такі самі як і на рис.1. Через амперметри з низьким внутрішнім опором проходить холівський струм I_y .

Для розрахунку рухливості переходимо від напруг до струмів (закон Ома) $U_x = I_x R_x = I_x \rho_x \frac{a}{b}$ і $U_y = I_y R_y = I_y \rho_y \frac{b}{a}$, де ρ - питомий опір.

Підставляємо обидві останні формули в (2) і отримуємо:

$$e \frac{I_y \rho_y \frac{b}{a}}{b} = e B \mu \frac{I_x \rho_x \frac{a}{b}}{a} \quad (5)$$

За умови малих магнітних полів \mathbf{B} вважаємо $\rho_y = \rho_x$ і після відповідних скорочень буде:

$$\mu = \frac{b I_y}{a B I_x} \quad (6)$$

А далі так само, як і при розрахунку концентрації Γ у вимірюваннях ЕРС Холла отримуємо формулу для Γ :

$$\Gamma = \frac{\sigma}{e\mu} = \frac{B I_x}{e U_y} \quad (7)$$

і відповідно для провідності:

$$\sigma = \frac{a I_x}{b U_x} \quad (8)$$

Для коректних вимірювань на досліді потрібно виконати необхідні співвідношення між розмірами зразка $a \ll b$ і $b \gg c$. На досліді вимірюються величини U_x , I_x , I_y і B . Для уникнення похибок внаслідок нееквіпотенціальності холівських контактів величина I_y вимірюється при двох протилежних напрямках магнітного поля \mathbf{B} , а при розрахунках усереднюється.

1.2 Установа, Київський ядерний мікрозонд

Скануючий ядерний мікрозонд [11,12] – виняткова, високотехнологічна установка, яка складається з: прискорювача ядер атомів (іонів) до енергій понад 1 МеВ, аналізуючий електромагніт, зондоформуюча система та декілька ядерно-фізичних методик. ЯМЗ використовується у більшості випадків, у якості мікроаналітичного приладу з відомими спектроскопічними методиками: PIXE (Particle Induce X-ray Emission) і BS (Backscattering Spectroscopy).

Київська установка ЯМЗ була спроектована й збудована в період 2003–2008 рр. на базі модернізованого однокінцевого електростатичного прискорювача іонів KN-3000 типу Ван де Граафа, 90° аналізуючого магніту з подвійним фокусуванням пучка іонів і оригінальної зондоформуючої системи довжиною 325 см.

Головні електротехнічні параметри цієї установки:

- тиск залишкового газу в мішеневій вакуумній камері: $2 \cdot 10^{-7}$ Торр;
- тип робочих іонів: протони або іони атомів гелію (альфа-частинки);
- середня енергія пучка робочих іонів: $E_0 = 1 \dots 2,2$ МеВ;

- енергетичний розкид іонів у пучку робочих іонів: $E \leq 200$ eВ;
- струм мікропучка іонів на дослідному зразку: - 1 пкА...15 нА;
- розмір мікропучка іонів на зразку: 2...50 мкм відповідно.

1.3 Новітні технології, що ґрунтуються на процесі опромінення зразка високоенергетичними іонами.

«З кінця минулого століття активно розвивається нова ЯМЗ-технологія: РВМ (Proton Beam Micromachining – обробки зразка мікропучком протонів), в якій застосовується дозоване локальне опромінювання зразка мікропучком протонів, середня енергія яких складає 1...3 МеВ. Таке опромінення веде до локальної руйнації (або перебудови) хімічних зв'язків між атомами в поверхневих шарах зразка. Шар опроміненого матеріалу зразка може бути видалений одним з відомих методів хімічної обробки – травленням.

Технологія РВМ була застосована й розвинута в безмасковій ЯМЗ-технології створення тривимірних мікроструктур (ґратів, фільтрів, хвилеводів, турбін, тощо) з високим аспектним співвідношенням (від 100 до 1000). Таким чином, була доведена конкурентоспроможність технології РВМ щодо традиційної масочної іонної технології.

В останні роки стали масово застосовувати технологію контрольованого опромінення напівпровідників високоенергетичним макропучком протонів, з ціллю модифікувати їх електротехнічні властивості. Як правило, зміна властивостей напівпровідникових зразків при його радіаційному опроміненні визначена зміною положення в ньому атомів домішок і/або виникненням в ньому радіаційних дефектів (РД) структури (наприклад, пар Френкеля). Утворені у напівпровідниковому зразку радіаційних дефектів, можуть виконувати роль донорів, акцепторів або центрів рекомбінації носіїв зарядів.»[12]

2 Експериментальна частина

2.1 Підготовка й конструкція зразків

Зразки виготовляли з германію, легованого сурмою $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і золотом $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Їм надавали форму паралелепіпедів, в бічні грані яких вплавляли індієві контакти, що служили омичними контактами до областей р-типу напівпровідника. Індієві контакти вплавляли в вакуумі або в нейтральному середовищі (азот) при температурі (450-500)С на протязі 15 хвилин. Після цього проводили скол зразка вздовж площини спайності (111). Проведення сколу зразка дозволяло отримати гладкі поверхні без наявності порушеного шару, що виникає при шліфуванні поверхні зразка. Невеликі ділянки поверхні, що мали невеликі відхилення від площини (111) мали невелику жорсткість у вигляді моноатомних східців. Ще однією суттєвою перевагою отримання зразків методом сколу був хороший контакт між вплавленими індієвими контактами й провідними каналами, що утворювались при імплантації легких іонів. Цей контакт утворювався незалежно від глибини проникнення імплантованих іонів вздовж напрямку (111), оскільки лінія сколу перетинала зразок по поверхні вплавленому контакту. Вигляд зразка до сколу показано на рис. 3 (а), а після сколу на рис. 3 (б). Сірим кольором на рис. 3 (б) позначені зони імплантації при вимірюваннях провідності.

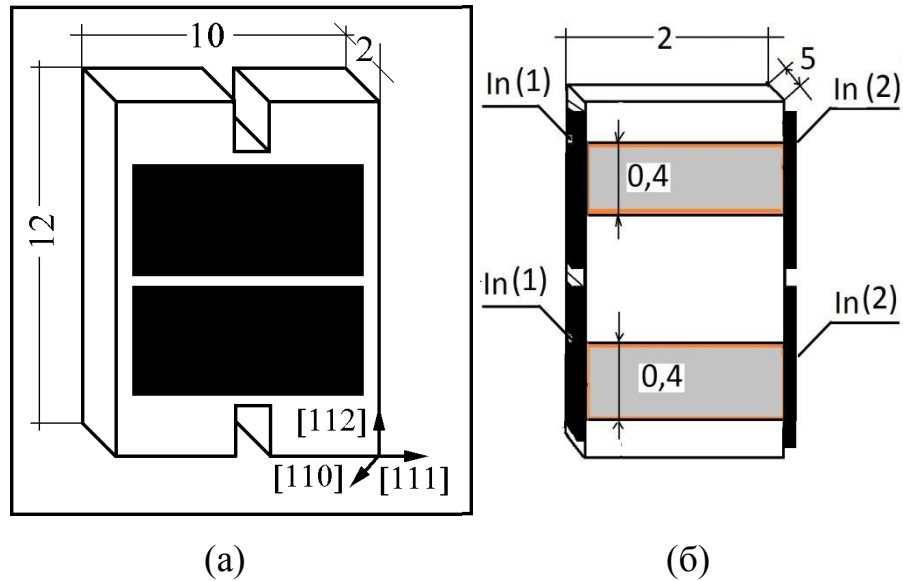


Рис. 3. Вигляд зразка (а) до розколу і (б) після проведення імплантації. Сірим кольором на рисунку (б) позначені зони імплантації при вимірюваннях провідності.

2.2 Проведення імплантації іонів водню.

Після сколу зразки поміщали в рідкий азот і вимірювали провідність σ_0 між контактами 1-2. Ця провідність була низькою $\sigma_0 \approx 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}$, оскільки, германій мав високий питомий опір при 77К. Тому можна було вважати, що зміни провідності зразка відбуваються шляхом проведення імплантації легких іонів водню або гелію. У цьому випадку в приповерхневій області зразка утворюється провідний канал [1]. Конструкція зразків у розрізах і їх орієнтація по кристалографічних напрямках показана на рис. 4. Стрілками на рисунку показано напрям імплантації легких іонів водню або гелію.

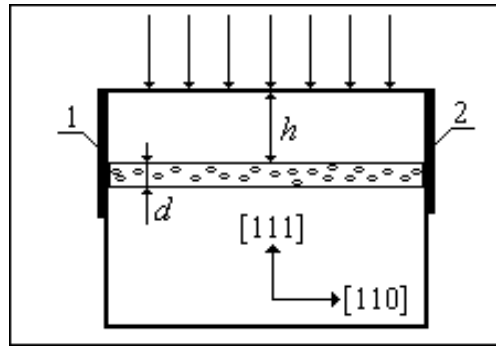


Рис. 4. Конструкція зразків у розрізах і його орієнтація по кристалографічних напрямках. Стрілками на малюнку показано напрям імплантації легких іонів водню та гелію. h - глибина залягання провідного каналу, d – товщина.

Зони опромінення на поверхні зразка (111) вибирались виходячи з методів дослідження. Так для дослідження провідності зони опромінення показані на рис. 3 (б). При дослідженнях ефекту Холла (ЕРС Холла) зони опромінення показані на рис. 5 (а). Ширина провідного каналу a (між контактами 1-2) в експериментах по вимірах ЕРС Холла дорівнювала 0,4 мм, а ширина підвідних контактів для вимірів ЕРС Холла дорівнювала 0,04мм. Довжина каналу b складала від 3 до 4 мм.

При дослідженнях ефекту Холла (струм Холла) зона опромінення показана на рис. 5 (б). В цьому випадку $a=2\text{мм}$, $b=8\text{мм}$.

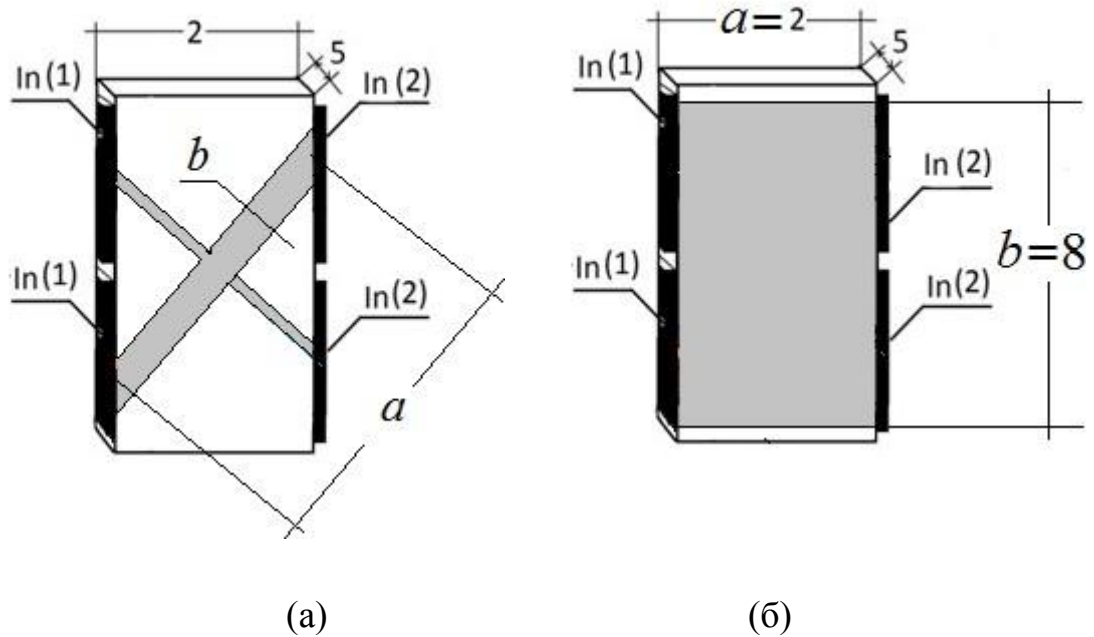


Рис. 5. Зони імплантації зразків іонами водню при вимірюваннях ЕРС Холла (а) струму Холла (б). Позначені сірим кольором.

Опромінення протонами проводилось на Київському ядерному мікрозонді. Детальний опис зразків та методи опромінення за допомогою Київського мікрозонда дано в [11,12]. Енергія сфокусованого променя була поглинута невеликим пікселем об'єму, що призвело до ефективного динамічного відпалу області каналу в процесі імплантації. Провідність зразка після опромінення стала на порядки більшою і майже повністю залежала від провідності каналу після імплантації іонами. Вимірювання проводили зі зразками, зануреними в рідкий азот або гелій. Для зразків, легованих з Sb та Au, об'ємна провідність була дуже низькою через компенсацію Sb глибокими рівнями Au. Енергія імплантації E становила 1,5Мев., а доза імплантації $D_p = 10^{15} \text{cm}^{-2}$.

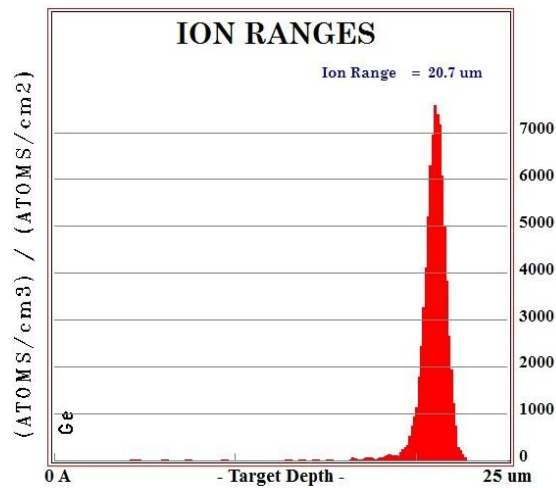


Рис. 6. Зупинені іони H^+ по глибині зразка германію. Енергія пучка протонів $E_p = 1,5\text{MeV}$

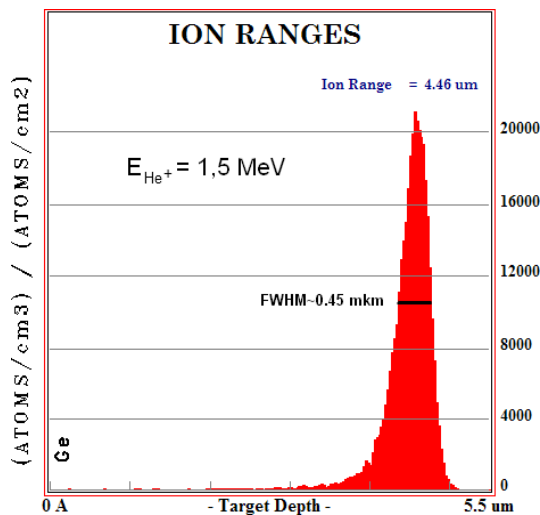


Рис. 7. Зупинені іони He^+ (б), по глибині зразка германію. Енергія пучка іонів гелію $E_{He} = 1,5\text{MeV}$

Результати розрахунків за програмою SRIM [13] опромінення германію протонами високих енергій і α -частинками показані на рис. 6 і рис. 7 відповідно. Розраховувались зупинені іони по глибині зразка германію при величині енергії налітаючих частинок $E_p = 1,5\text{MeV}$. Як видно з порівняння рисунків 6 і 7 результати опромінення германію іонами водню і гелію є

аналогічними. Основна відмінність між ними полягає у різних глибинах розташування максимальної концентрації дефектів і, відповідно, концентрації проникаючих іонів. При опроміненні іонами водню та гелію утворення дефектів відбувається найінтенсивніше в кінці їх гальмівного шляху. Тому модифікація властивостей германію і відбувається на цій глибині [1-3]. Виходячи з цих міркувань можна оцінювати товщину каналу d і розрахувати об'ємні електрофізичні характеристики модифікованого каналу.

Після вимірювань провідності об'єму σ_0 , зразок поміщали у вакуумну камеру мішені установки скануючого ядерного мікрозонда й проводили його опромінення за технологією PBM (Proton Beam Micromachining). Установка забезпечувала високу моноенергетичність іонів - розкид енергій протонів в пучку не перевищував 10^{-2} відсотка при їх енергії $E_i=1,5\text{MeV}$. Зразок опромінювали при температурі 300К інтегральною дозою імплантації протонів $D_p = 10^{15}\text{cm}^{-2}$.

2.3 Установка для низькотемпературних вимірювань методом струму Холла

2.3.1 Принципова схема вимірювань струму Холла

Конструкція зразка для досліджень по методу струму Холла показана на рис. 5(б). Необхідні для коректного застосування методу струму Холла співвідношення між довжиною зразка a і шириною b провідного каналу зразка ($b/a=4$), а також між шириною розриву індієвого контакту c і розміром a ($a/c=5$) забезпечувалось відповідним вибором розмірів вплавних контактів та самого зразка.

Вимірюваними на досліді величинами були повздовжні напруга U_x , і струм I_x , холівський струм I_y і величина магнітного поля \mathbf{B} . З цими величинами однозв'язані величини рухливості, концентрації вільних дірок у приповерхневому каналі та провідність зразка по формулах (6) – (8).

На рис.8 представлена принципова схема вимірювань за методом струму Холла.

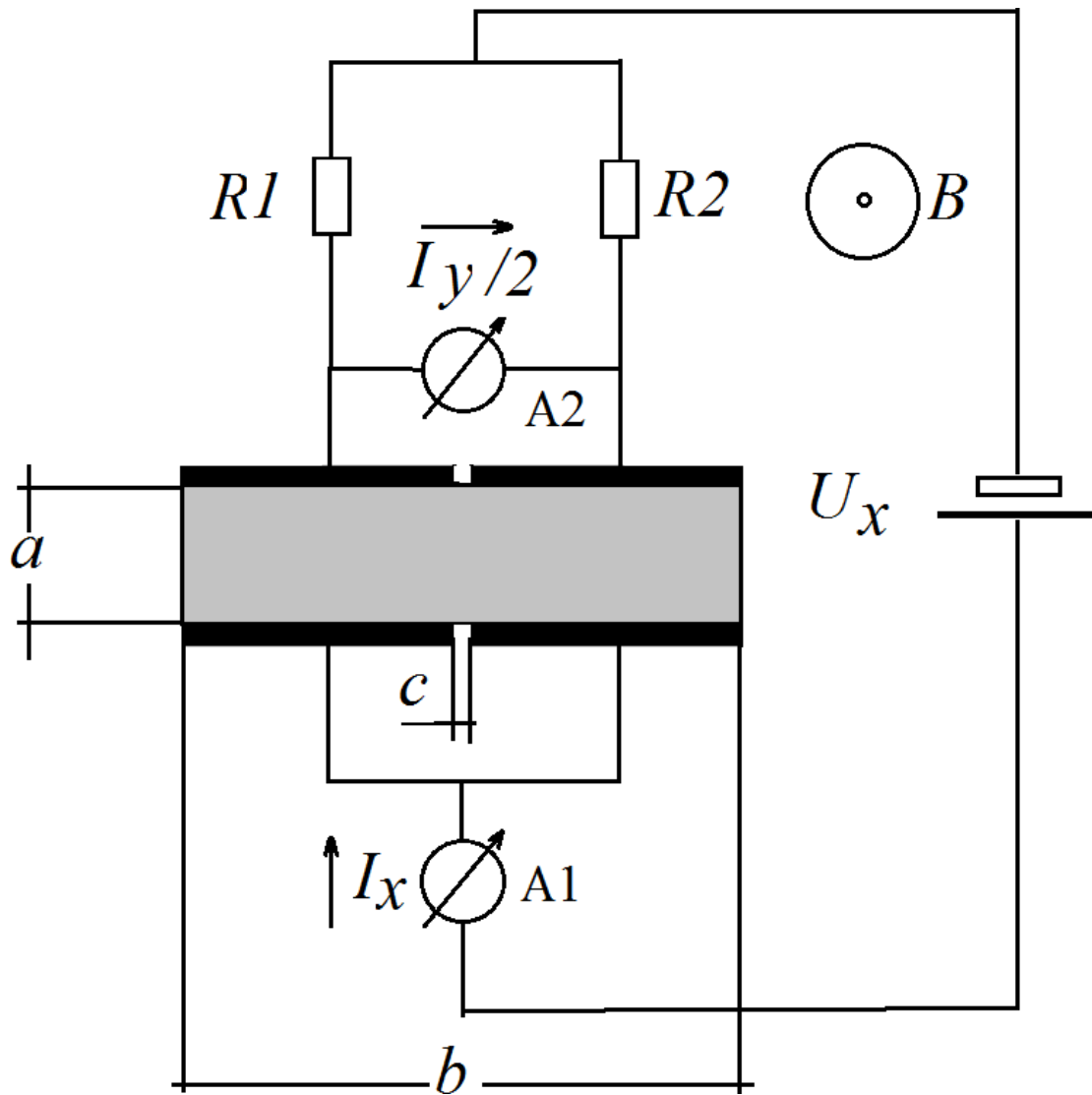


Рис. 8. Схема вимірювань: A1 і A2 прилади для вимірювання повздовжнього струму I_x і холівського струму I_y відповідно, резистори R1 і R2 резистори балансування схеми при $\mathbf{B}=0$.

2.3.2 Блок - схема установки

Блок - схема установки представлена на рис. 9. Склад установки включає постійний магніт з розсувними полюсами, що може генерувати постійне

магнітне поле з двома фіксованими значеннями індукції B рівними $0,012\text{T}$ і $0,14\text{T}$. Для вимірювання електричних величин застосовувались універсальні вольтметри GDM8642. Напруга на зразок подавалась з універсального джерела живлення.

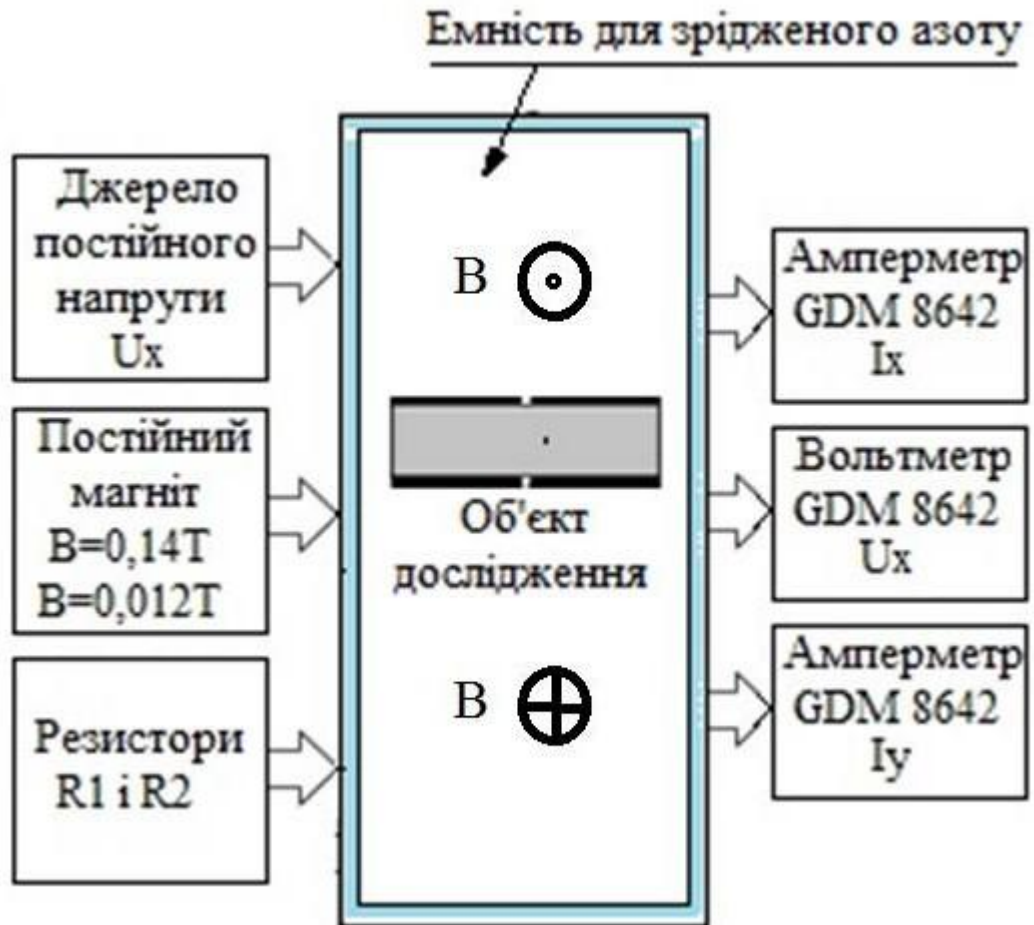


Рис. 9.- Блок - схема установки для вимірювань електрофізичних параметрів методом струму Холла.

Алгоритм проведення вимірів включав охолодження зразка, перевірку зразка на наявність коротких замикань і наступні електрофізичні дослідження при двох значеннях магнітної індукції і двох напрямках магнітного поля.

2.4 Експериментальні результати і їх обговорення

Імплантація протонів у зразки германію проводилась за енергії $E_i=1,5\text{MeV}$ і дозою $D_i=10^{15}\text{cm}^{-2}$ по зоні імплантації показаній на рис. 5(б). Доза імплантації була вибрана оскільки при такій дозі досягається максимальна провідність каналу [4]. Після імплантації протонів у зразках германію, так само як описано в більш ранніх роботах [1-5], виникали провідні канали. Вимірювання за методом струму Холла проводились на установці описаній вище в розділі 2.3. Проведені вимірювання показали, що переніс заряду в утворених каналах відбувається вільними дірками.

2.4.1 Провідність каналів

На рис. 10 наведена залежність питомої провідності σ_c каналів в германії від повздовжньої напруги U_x після обробки отриманих ВАХ. Дані по σ_c усереднені для двох напрямків прикладеної повздовжньої напруги U_x . З рисунку видно, що величина σ_c у визначеному інтервалі напруг є константою з хорошою точністю (з точністю до величини похибки приладів). Це означає, що у вибраному інтервалі напруг ВАХ зразка є лінійною і приконтактні ефекти (наприклад неомічність) або ефект перегріву зразка в області великих напруг не впливає на лінійність ВАХ.

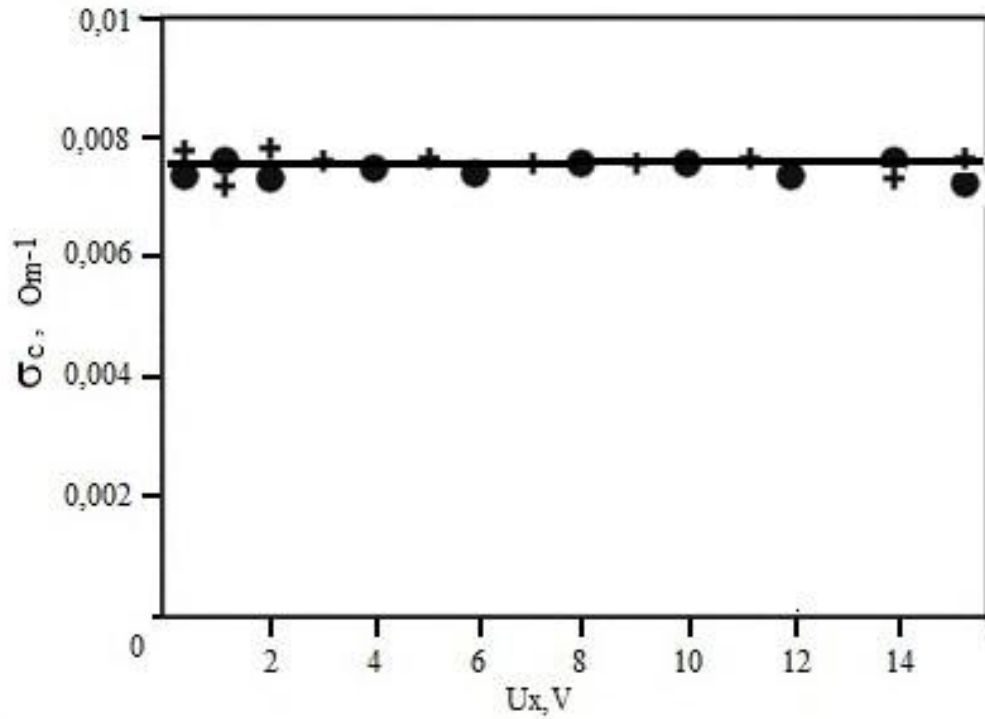


Рис. 10. Залежність питомої провідності σ_c каналів у германії від повздовжньої напруги U_x при величині $B=0$. Хрести (+) показують результати вимірів при $B=0,14\text{T}$, зафарбовані кола (●) при $B=0,012\text{T}$

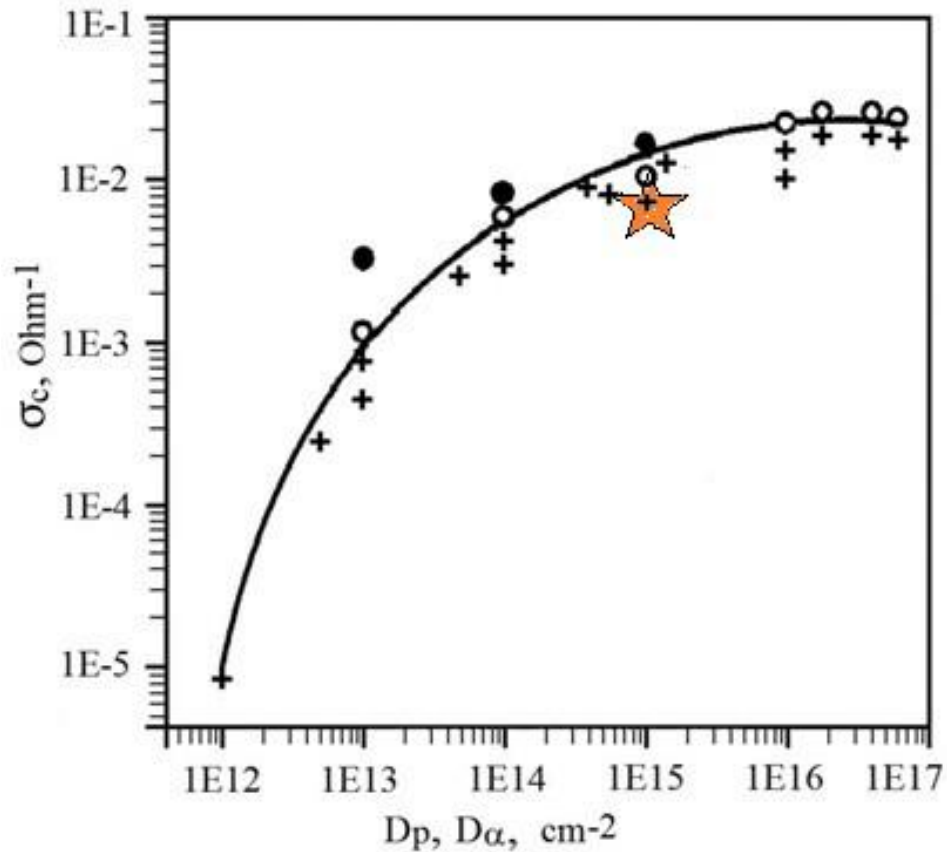


Рис.11. Питома електропровідність σ_c на одиницю площі каналів як функція імплантацій дозами D_p або D_a при 77К. Хрести (+) показують результати однократного опромінення різних зразків протонами, кола (o) - результати послідовного збільшення доз протонного опромінення одного зразка, зафарбовані кола (●) - результати одноразового опромінення різних зразків іонами гелію [1-5]. Зірочкою позначено виміри методом струму Холла зроблені в поданій роботі.

Для порівняння на рис. 11 наведена залежність питомої провідності σ_c каналів в германії від дози опромінення протонами D_p або α -частинками D_a [1-5]. По рисунку Хрести (+) показують результати одноразового опромінення різних зразків протонами, кола (o) - результати послідовного збільшення доз протонного опромінення одного зразка, зафарбовані кола (●) - результати одноразового опромінення різних зразків іонами гелію [1-5]. Зірочкою позначено виміри методом струму Холла зроблені в поданій роботі. З рисунку

видно, що виміряна методом струму Холла величина σ_c при $D_p=10^{15}\text{см}^{-2}$ добре узгоджується з отриманими раніше даними (з точністю до величини похибки приладів). В нашому випадку це означає, що виміри провідності на установці призначеної для досліджень методом струму Холла співпадають з даними отриманими на установці призначеній для вимірювань методом ЕРС Холла.

2.4.2 Рухливість вільних дірок у каналах

На рис. 12 наведена залежність холівської рухливості μ_h вільних дірок від повздовжньої напруги U_x . З рисунку видно, що величина μ_h у визначеному інтервалі напруг є константою з хорошою точністю (з точністю до величини похибки приладів). Це означає, що у вибраному інтервалі напруг μ_h дірок всі інші можливі ефекти (згадані у 2.3.1) не впливають на величину μ_h .

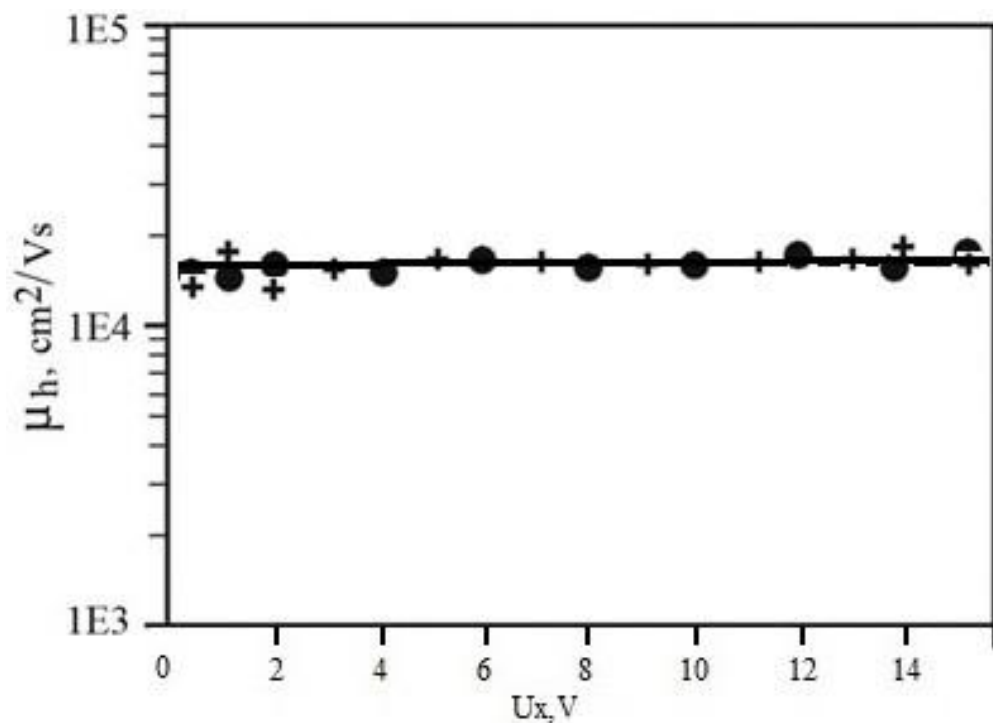


Рис. 12. Залежність холівської рухливості дірок μ_h в каналах від повздовжньої напруги U_x при величині $B=0,012\text{T}$ - хрести (+) і $B=0,14\text{T}$ - зафарбовані кола (●).

Для порівняння на рис. 13 наведена залежність холівської рухливості μ_h вільних дірок від дози опромінення протонами D_p або α -частинками D_α [1-5]. На рисунку хрести (+) показують результати одноразового опромінення різних зразків протонами, кола (o) - результати послідовного збільшення доз протонного опромінення одного зразка, зафарбовані кола (●) - результати одноразового опромінення різних зразків іонами гелію [1-5]. Зірочкою позначено виміри методом струму Холла зроблені в поданій роботі. З рисунку видно, що виміряна методом струму Холла величина μ_h при $D_p=10^{15}\text{cm}^{-2}$ добре узгоджується з отриманими раніше даними (з точністю до величини похибки приладів). Це означає, що виміри μ_h отримані за допомогою методу струму Холла співпадають з даними отриманими методом ЕРС Холла.

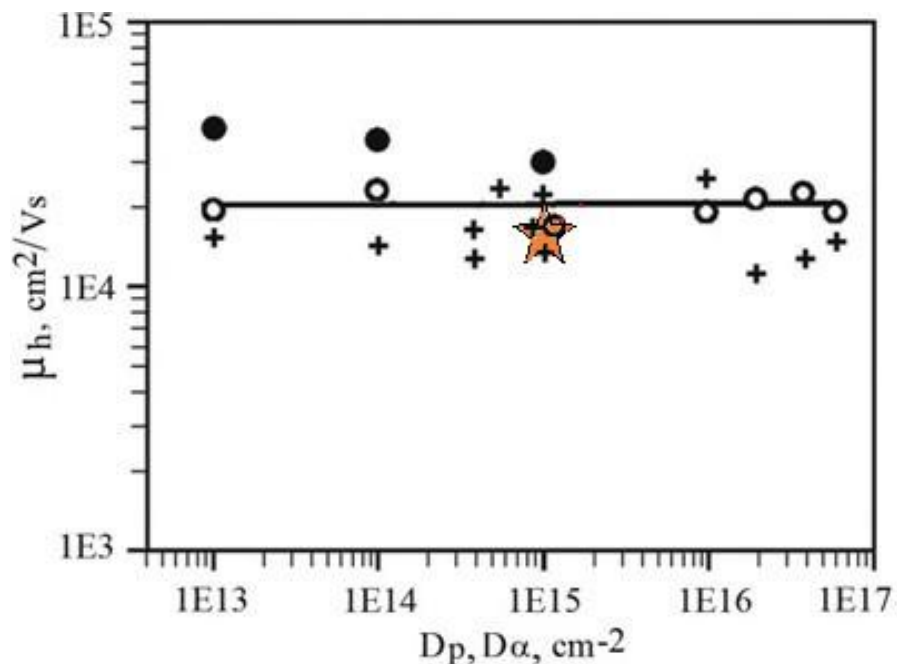


Рис. 13. Залежність рухливості Холла μ_h носіїв електричного струму як функція доз імплантації іонів D_p або D_α при 77К. Вимірювання проводили одночасно зі зразками, які використовувались для вимірювання провідності σ_c .

Позначення експериментальних точок відповідають тим, що і на рис. 11. Зірочкою позначено виміри методом струму Холла зроблені в поданій роботі.

2.4.3 Концентрація вільних дірок в каналах

На рис. 14 наведена залежність концентрації Γ вільних дірок від повздожньої напруги U_x . Наведені дані рис. 14 розраховували з даних рис. 10 і рис.12. Відповідно і величина Γ у визначеному інтервалі напруг є константою з хорошою точністю (з точністю до величини похибки приладів).

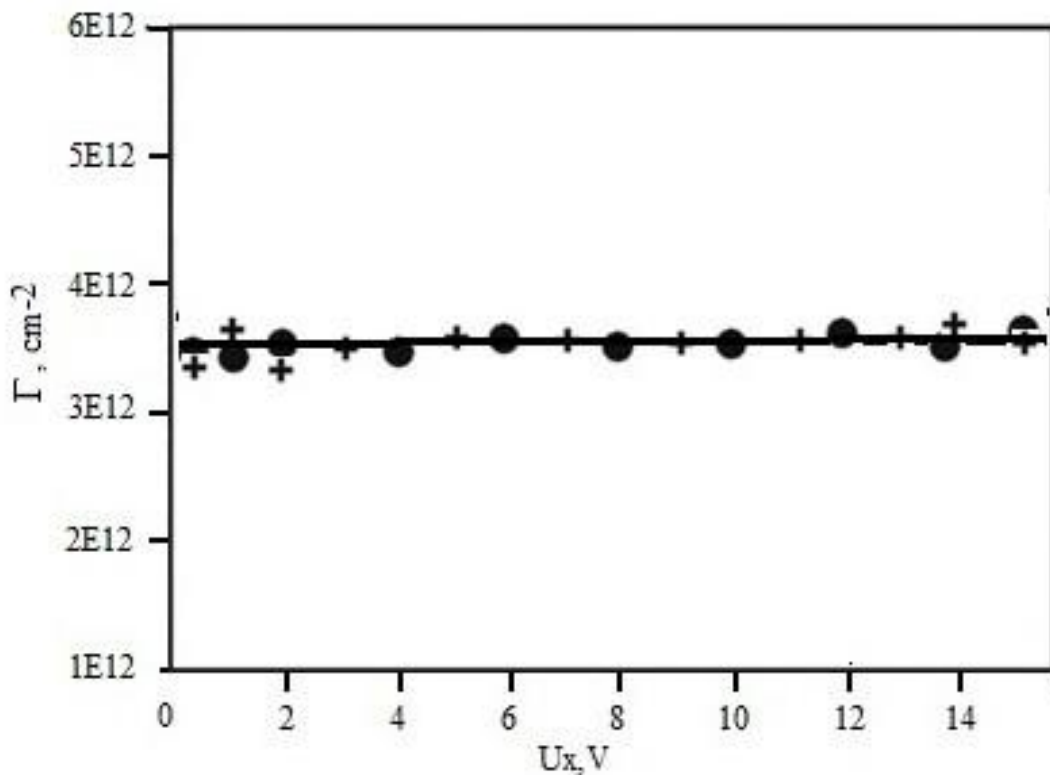


Рис. 14. Залежність розрахованої концентрації Γ в каналах від повздожньої напруги U_x при величині $B=0,012$ Т - хрести (+) і $B=0,14$ Т - зафарбовані кола (●).

Як вже зазначалось вище, характеристики досліджених процесів переносу вільних носіїв заряду в приповерхневих провідних каналах у германію не залежали від вибору холівського методу вимірювань.

2.4.4 Обговорення отриманих результатів.

Співпадіння значень рухливості μ_h отриманих за допомогою двох холівських методів є вагомим аргументом на користь відсутності принципових похибок у здійснених вимірюваннях. Дійсно, по-перше, вимірювання струму замість напруги в багатьох випадках є доцільнішим внаслідок того, що можливі перешкоди набагато менше позначаються на приладах з малим вхідним опором ніж з великим і по-друге, метод струму Холла добре пристосований для роботи з високоомними зразками. Ці дві переваги, взагалі кажучи не принципові, їх можна назвати радіотехнічними. Але в нашому випадку, роботи зі сколотими зразками розміром (2×8)мм, суттєвою перевагою методу струму Холла є можливість не зважати на отримані в результаті опромінення розміри області каналу, оскільки опромінюється вся поверхня зразка (рис. 5 (б)). Зазначимо, величина μ_h обернено пропорційна ширині каналу v і будь-яка похибка у визначенні v спотворює результати холівських вимірів. Довжиною і шириною каналу, в нашому випадку, будуть ті самі розміри зразка 2мм і 8мм. Також зауважимо, що фокусування пучків легких іонів високих енергій, особливо іонів гелію, може викликати значні експериментальні труднощі. Ще більші труднощі викликає встановлення реальних, експериментально перевірених, розмірів пучка, що значною мірою залежать від режимів роботи прискорювача. І насамкінець, по наростанню, ще більші труднощі викликає встановлення однорідності пучка по його площі. Це вимагає копіткої експериментальної перевірки для кожного режиму роботи прискорювача. Водночас для опромінення наших зразків можна використовувати не сфокусований пучок міліметрових розмірів і обмежитись фокусуванням тільки діафрагмами. Це дає значні переваги при проведенні експерименту.

Також зазначимо, що в роботі [14] було показано, що при утворенні дефектів при бомбардуванні легкими іонами зростають механічні деформації в просторі навколо дефектів. Цей фактор може спричинити зміни (в нашому

випадку зростання) значення μ_h , що викликається зменшенням ефективної маси дірок у полі деформації [7, 15,16]. Зокрема, механічні напруження можуть викликати модифікацію валентної енергетичної зони Ge таким чином, що роль легких дірок у переносі струму зростатиме [17,18]. Можливі також і інші, альтернативні, пояснення тих значень рухливості μ_h , що спостерігаються на досліді.

Результати, отримані в поданій роботі не входять у суперечність з існуючими даними й практично знімають сумніви у достовірності експериментальних результатів отриманих обома холівськими методами. Це свідчить про можливість і перспективність застосування пропонованого способу модифікації германію для використання в мікроелектроніці.

ВИСНОВКИ

1. Методом струму Холла досліджені основні електрофізичні характеристики провідних каналів виникаючих при бомбардуванні германію протонами.

2. Показана достовірність отриманих раніше даних характеризуючих процеси переносу в опроміненій приповерхневій області германію. Зокрема показано, що протонна модифікація германію дозволяє цілеспрямовано створювати провідні канали з високими значеннями рухливості $\approx 2T^{-1}$ при 77К, що близькі до значень рухливості в чистих монокристалах ($\approx 4T^{-1}$ при 77К).

3. Отримані результати дозволяють прогнозувати можливість практичного застосування такого роду легування германію, оскільки електрофізичні характеристики (питома провідність, концентрація і рухливість) досліджених зразків є типовими, що застосовуються в мікроелектроніці. Зокрема таке легування, може бути особливо перспективним, як частина технології структур германій-на-ізоляторі. Також, протонна обробка германію, може бути основою нової технології створення провідних областей у германії, а саме технологією Conductive PBW.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Ю.С. Жарких, С.В. Лысоченко, С.А. Лебедь, О.Г. Кухаренко, Н.Г. Толмачев, О.В. Третьяк Образование скрытых проводящих каналов при бомбардировке германия протонами высоких энергий, письма в ЖТФ, **39**, 19-24 (2013).
- 2 Звіт про науково-дослідну роботу: „Розробка принципів нових технологій на основі досліджень оптичних, електронних та атомарних явищ в фізичних і біологічних об’єктах та низьковимірних структурах”, номер держреєстрації №0114U003468. С.134-140, 2015.
- 3 Звіт про науково-дослідну роботу: „Електронні, оптичні, та магнітні властивості наноструктурованих матеріалів та низьковимірних систем”, номер держреєстрації №0116U004756. С.134-140, 2015.
- 4 Жарких Ю.С., Лисоченко С.В., Кухаренко О.Г., Третьяк О.В., Глушко К.Е., Скрипчук А.І., Васильев А.Г., Толмачов Н.Г. Провідність прихованих каналів в германії при різних дозах опромінення протонами високих енергій. IV міжнародна науково-практична конференція "Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка": тези доповідей. - Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2016. - 280с. стр. 194-196. ISSN 2222-4386 26-28 травня.
- 5 Звіт про науково-дослідну роботу: „Електронні, оптичні, та магнітні властивості наноструктурованих матеріалів та низьковимірних систем”, номер держреєстрації №0116U004756. С.134-140, 2015.
- 6 Xiao Yu. Characterization of ultrathin-body Germanium-on-insulator (GeOI) structures and MOSFETs on flipped Smart-Cut™ GeOI substrates / Jian Kang, Rui Zhang, Mitsuru Takenaka, Shinichi Takagi // Solid-State Electronics, 2016. Vol. , pp. 120-125.
- 7 S. Dissanayake, Y. Zhao, S. Sugahara, M. Takenaka, and S. Takagi, J. Appl. Phys. 109, 033709 (2011).

- 8 Yu. X. Kang, J. Zhang, R. Takenaka, and S. Takagi, *Solid-State Electron. B*, 115, 120 (2016).
- 9 Z. Zheng, X. Yu, M. Xie, R. Cheng, R. Zhang, and Y. Zhao, *Appl. Phys. Lett.* 109, 023503 (2016). doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4955486>.
- 10 B. Yurong, Xu. Jingping, L. Lu, and F. Minmin, *Chinese J. of Semiconductors* 35, 094002 (2014).
- 11 S. Lebed, M. Tolmachov, O. Kukhareenko, and O. Veselov, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section B* 267, 2013 (2009).
- 12 S. Lebed, Z. Stachura, M. Cholewa, G.J.F. Legge, J. Lekki, S. Maranda, A. Potempa, C. Sarnecki, Z. Szklarz, J. Styczen, B. Sulkió-Cleff The new Cracow scanning nuclear microprobe, *NIMB*, 181, 95–98 (2001).
- 13 J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, and J.P. Biersack, *SRIM: the stopping and range of ions in matter*, Raleigh, NC: Cadence Design Systems, 398p. (2008).
- 14 Yu.S. Zharkikh, S.V. Lysochenko, O.G. Kukhareenko, O.V. Tretiak, Conductive Channels Formed in Germanium by High-Energy Protons and Alpha Particles, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Rev. B*, 441, (2019), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X18307237> .
- 15 T. Hosoi, Y. Suzuki, T. Shimura, H. Watanabe, Mobility characterization of Ge-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with striped Ge channels fabricated by lateral liquid-phase epitaxy, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 173502 (2014); <https://doi.org/10.1063/1.4900442>.
- 16 C. Riddet, J.R. Watling, K-H Chan, E.H.C. Parker, T.E. Whall, D.R. Leadley, A. Asenov, Hole Mobility in Germanium as a Function of Substrate and Channel Orientation, Strain, Doping, and Temperature, *IEEE Transactions on Electron Devices* 59(7), (2012), 1878 – 1884.
- 17 Z.-T. Zhan, D. Ma, X.-B.Liu, W.-L. Zhu, M. Song, Preparation and investigation of GOI material by using smart-cut technology, *Gongneng Cailiao yu Qijian Xuebao/Journal of Functional Materials and Devices* 13 (3), (2007), 207-212.
- 18 X.Yu Xiao Yu, J. Kang, R. Zhang, M. Takenaka, Sh. Takagi, Characterization of ultrathin-body Germanium-on-insulator (GeOI) structures and MOSFETs on

flipped Smart-Cut™ GeOI substrates, Solid-State Electronics B, 115 (2016), 120-125.

19 Васюра А.С. – книга «Елементи та пристрої систем управління автоматики»

20 Введение в химию полупроводников Издание 2 (1975)

ДОДАТОК А

1.1. Процес травлення

Травлення – це ряд технологічних прийомів, за допомогою яких можна вести видалення поверхневого шару матеріалу з зразків під дією хімічних речовин.

Ряд способів травлення передбачає активацію травлячих реагентів, яке відбувається за рахунок інших фізичних явищ, наприклад нанесенням при електрохімічному травленні, зовнішнього електричного поля, іонізацією атомів і молекул реагентів при іонно-плазмонному травленні й тому подібне.

1.1.1 Методи травлення

Травники використовуються для переносу малюнка фоторезистивної маски в нижче лежачий шар матеріалу за діями селективного видалення.

Є такі види травників:

- рідинне травлення (хімічне)
- іонно-плазмонне (сухе) травлення
- електрохімічне травлення

1.1.2 Вимоги до травників

Застосовувані травники повинні:

- володіти селективністю, тобто здатністю активно вступати в реакцію з основним технологічним шаром, не взаємодіючи з плівкою фоторезиста і нижніми технологічними шарами;

- не утворювати продуктів реакції (сильне газовиділення), що сприяють відшаровування плівки фоторезиста по контуру елементів малюнка і підтравленню;
- мати перспективу підбору добірної для даних вимог швидкості травлення, що надає мінімальну щільність недоліків одержаного малюнку.

1.1.3 Застосування травлення

Травлення застосовується:

- щоб зняти поверхневий шар забруднень, оксидів, жирової плівки і т.п.;
- щоб нанести рельєфний малюнок при обробці матеріалу (зазвичай металів);
- щоб утворити провідні доріжки й контактні площадки при виготовленні друкованих плат;
- щоб створити мембрани (за допомогою використання методу фотолітографії, витравлювати надмалі отвори);
- щоб провести хімічне полірування поверхні й скоротити порушений шар, який утворився під час механічної обробки.

1.1.4 Травники для травлення германію

Травлення германію при нормальній температурі в будь-яких поліруючих складах, наприклад у сумішах азотної і плавикової кислот, при недостатньому перемішуванні дає нерівні, хвилясті поверхні. Зазвичай травники, що містять перекис водню, дають хороші результати, але після обробки ними поверхня германію набуває шорохувату текстуру. Така текстура не заважає вплавленню, але може приховувати дефекти кристалічної решітки напівпровідникового матеріалу, які впливають на якість переходів.

Название травителя	Состав травителя	Условия травления	Скорость травления, мкм/мин	Примечание
Германий				
Иодный	10 мл HNO ₃ + 5 мл HF + 11 мл CH ₃ COOH + 30 мл I ₂	Комнатная температура	37	Применяется для травления плоскости (100)
CP-4	25 об. ч. HNO ₃ + 15 об. ч. HF + 15 об. ч. CH ₃ COOH + 0,3 об. ч. Br ₂	То же	30-50	
CP-4A	5 об. ч. HNO ₃ + 3 об. ч. HF + 3 об. ч. CH ₃ COOH	»	30	
Ртутный ДЭША	4 об. ч. HNO ₃ + 2 об. ч. HF + 15 об. ч. CH ₃ COOH	»	25	
Ртутный	30 мл HNO ₃ + 30 мл HF + 40 мл H ₂ O с 1,33 г Hg(NO ₃) ₂	»		
Медный	1 об. ч. HNO ₃ + 2 об. ч. HF + + 1 об. ч. 10% Cu(NO ₃) ₂	»	12	Применяется для травления плоскостей (100), (111)
Серебряный	1 об. ч. HNO ₃ + 2 об. ч. HF + 2 об. ч. 5% AgNO ₃	25 °С	25	Применяется для травления плоскости (110) с осаждением на поверхности серебра
Перекисный	2 об. ч. 30% H ₂ O ₂ + 1 об. ч. 48% HF	Комнатная температура	8,5	
№ 2 (супер оксоль)	1 об. ч. H ₂ O ₂ + 1 об. ч. HF + 4 об. ч. H ₂ O	То же		
Травитель фирмы RCA	600 см ³ HNO ₃ ; 300 см ³ CH ₃ COOH; 100 см ³ HF; 25 мг KI	Комнатная температура	1,2	
Травитель фирмы RCA	10 мл HNO ₃ 10 мл насыщенного раствора щавелевой кислоты COOH-COOH	35 °С	0,8	
	7 мл HCl; 1 мл HNO ₃ в уксусной кислоте или глицерине	35 °С	1,5	
Гипохлорит натрия	1 об. ч. 10% NaOCl + 10 об. ч. H ₂ O	40 °С		

Рис. А 1. Травники для травления германию.

Травники для германию готують в залежності від вимог хімічної обробки: дзеркальності або матовості поверхні пластин, селективності, виявлення дефектів та інше. Для травлення германию використовують пергідролеві, лужні і кислотні травники.

Пергідролеві травники представляють собою суміші пероксиду водню H₂O₂ з водою різних концентрацій (зазвичай від 5 до 30% H₂O₂). Травлення проводять при температурі кипіння. Після обробки в такому травнику пластини германию мають матову поверхню.

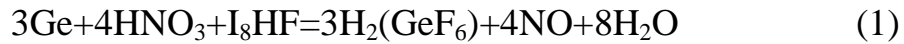
Травники, в яких найбільш повільними етапами є дифузійні, називаються поліруючими. Ці травники нечутливі до неоднорідностей поверхонь, згладжують шорсткості і вирівнюють мікрорельєф. Швидкість травлення істотно залежить від в'язкості і перемішування травника і незначно від температури.

Ось такі поліруючі травники:

- CP-4
- Водневі

- Пергідролевий травник

Травлення германію. Кислотний травник СР-4 має поліруючу дію. Він складається з азотної, плавикової, оцтової кислот і бром. Азотна й плавикова кислоти – це окислювач і комплексоутворювач. Процес травлення описується сумарним рівнянням.



Оцтова кислота – сповільнювач. Процес травлення з тими ж компонентами без оцтової кислоти йде настільки швидко, що перестає бути контрольованим. Реакція є автокаталітичною. Процесу травлення передуює тривалий індукційний період пов'язаний з каталітичною дією NO і NO₂, накоплюючим в результаті реакції. Бром прискорює процес утворення HNO₂, і NO₂.



Бромистий водень окислюється азотною кислотою знову до вільного бром. Таким чином, достатньо невеликої кількості бром, щоб в процесі травлення зберігалася необхідна концентрація NO₂.

Окрім СР-4 при виробництві напівпровідникових германевих приладів часто використовують травники, що містять перекис водню і плавикову кислоту (Пергідролевий травник). Травлення відбувається за рахунок утворення фторокомплексів германію (H₂O₂ – окислювач, HF – комплексоутворювач). Травник є поліруючим і характеризується невеликою швидкістю травлення. Схожим до нього є луговий пергідролевий травник.

2 А. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір травника

Для відновлення зразків нами був вибраний пергідролевий травник. Спочатку ми використали H_2O_2 (10%) травник, але через те що травлення відбувається дуже повільно, результат був не задовільний, після чого далі ми обрали H_2O_2 (30%). Протравивши зразок у різні проміжки часу ми побачили результат. Щоб проводити досліди нам потрібно було підготувати зразки.

2.2 Дослідження швидкості травлення германію.

Виміри швидкості травлення в пергідролевому травнику проводилась на германієвих пластинах товщиною приблизно 1,5мм.

Кожну пластину після різки і хімічного полірування матеріалу, бруд і все інше видаляли за допомогою промивки зразків у дистильованій воді, знежирюванні в етиловому спирті та потім висушували.

2.3 Травлення зразків

Пластини, які ми отримані в результаті різки та підготовки, мають недосконалу поверхню, деформований поверхневий шар. Тому для того, щоб зробити поверхневий шар більш рівним, доцільно застосовувати хімічне травлення. Зміну якості шару визначали за зміною середньої величини швидкості травлення у травнику складу H_2O_2 та виміряли за допомогою мікрометра. На підігріту плиту ми ставили хімічну колбу в якій знаходився травник, доводили його до кипіння, після чого туди поміщали наші зразки й при різному проміжку часу ,й різних концентраціях травника знімали показання. Весь цей час ми слідкували за проведенням досліду.



Рис. А 2. Зовнішній вигляд досліджуваних зразків.

2.4 Виміри товщини пластин.

Вимірювання товщини пластини проводилися до проведення процесу травлення і після очистки германієвих пластин, методом травлення. Кожну пластину ми вимірювали по 8 разів у різних точках, щоб потім усереднити значення і наблизити його до більш точного, за допомогою мікрометра.

Зразок №1.

До проведення операції травлення		Після травлення на протязі 120 секунд	
№	X_a , мм	№	X_b , мм
1	1,46	1	1,45
2	1,46	2	1,455
3	1,46	3	1,455
4	1,46	4	1,445
5	1,45	5	1,45
6	1,46	6	1,445
7	1,46	7	1,445
8	1,45	8	1,45
	$X_{a\text{сер}}=1,457$		$X_{b\text{сер}}=1,449$

$\Delta=$	$\pm 0,008$ мм
-----------	----------------

Зразок №2.

До проведення операції травлення		Після травлення на протязі 300 секунд	
№	X_a , мм	№	X_b , мм
1	1,46	1	1,445
2	1,46	2	1,445
3	1,46	3	1,44
4	1,45	4	1,44
5	1,45	5	1,445
6	1,46	6	1,44
7	1,46	7	1,44
8	1,45	8	1,44
	$X_{a\text{сер}}=1,45$		$X_{b\text{сер}}=1,440$
$\Delta=$	$\pm 0,016$ мм		

Зразок №3.

До проведення операції травлення		Після травлення на протязі 600 секунд	
№	X_a , мм	№	X_b , мм
1	1,46	1	1,435
2	1,46	2	1,43
3	1,46	3	1,43
4	1,455	4	1,43
5	1,455	5	1,43
6	1,46	6	1,43
7	1,46	7	1,435
8	1,46	8	1,435

	$X_{a\text{сер}}=1,458$		$X_{b\text{сер}}=1,43$
$\Delta=$	$\pm 0,028$ мм		

Виходячи з даних вимірів була встановлена швидкість травлення - що дорівнювала 1мкм за 20с.