

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра фізики та астрономії

(повна назва кафедри)

## Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти « магістр »

**«Вплив режимів халькогенідної обробки на проходження струмів у  $p-n$  переходах на основі арсеніду галію»**

«The influence of chalcogenide treatment modes on the current flow of gallium arsenide  $p-n$  junctions»

Виконав: здобувач денної форми навчання спеціальності 104- Фізика та астрономія  
(код, назва спеціальності)

Освітня програма Фізика та астрономія  
(назва)

Шершньов Ігор Ігорович

(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)

Керівник к.ф.-м.н., доцент Маслєєва Н.В.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент к.ф.-м.н., доцент Загинайло І.М.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:  
Протокол засідання кафедри  
фізики та астрономії  
№ \_\_\_\_ від \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 20 \_\_\_\_ р.

Завідувач кафедри  
Гоцульський Володимир  
(підпис) (прізвище, ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № \_\_\_\_  
протокол № \_\_ від \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 20 \_\_\_\_ р.

Оцінка \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_  
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК  
Гоцульський Володимир  
(підпис) (прізвище, ім'я)

Одеса 2024

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ВЛАСТИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ ГРУПИ $A^{III}B^V$ 3	3
ХАЛЬКОГЕНІДНОМОДИФІКОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ.....	4
1.1. Формування халькогенідного пасивуючого покриття.....	4
1.2. Вплив халькогенідної обробки поверхні на властивості напівпровідників.....	6
1.3. Застосування халькогенідної обробки для покращення характеристик напівпровідникових приладів.....	9
1.4. Деградація характеристик напівпровідникових приладів після халькогенідної обробки поверхні .....	13
2. ВПЛИВ РЕЖИМІВ ХАЛЬКОГЕНІДНОЇ ОБРОБКИ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ $P$ - $N$ ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ $GaAs$ .....	15
2.1. Структура діодів на основі арсеніду галію і методика вимірювання електричних характеристик у повітрі.....	15
2.2. Вплив халькогенідної обробки на ВАХ прямого і оберненого струмів $p$ - $n$ переходів на основі $GaAs$ .....	18
2.3 Вплив тривалості халькогенідної обробки на ВАХ $p$ - $n$ переходів на основі $GaAs$ .....	24
ВИСНОВКИ.....	28
ЛІТЕРАТУРА.....	29

## ВСТУП

Зменшення розмірів напівпровідникових приладів призводить до збільшення впливу поверхні на їхні характеристики. Сучасні методи обробки поверхні складаються з двох різних технологічних операцій. При травленні з поверхні видаляють оксидний шар, а потім наносять захисне покриття. Халькогенідна обробка ці процеси поєднує в один технологічний цикл. Після халькогенідної обробки поверхні повністю або часткове видаляються поверхневі оксиди, відбувається реконструкція поверхні та утворюється пасивуючий шар сполук галію з халькогеном. Внаслідок халькогенідної обробки змінюється щільність поверхневих станів. Це призводить до покращення характеристик напівпровідникових приладів. Однак систематичні дослідження дії халькогенідної пасивації, проведені для різних розчинників, їх концентрацій, різних тривалостях обробки досі відсутні.

Метою даної роботи було виявлення механізмів впливу халькогенідної обробки різної тривалості на властивості діодів на основі арсеніду галію.

Для виконання поставленої мети проводилися дослідження вольт-амперних характеристик діодів на основі *GaAs* до та після сульфідної або селенідної обробки різної тривалості у 30% водному розчині при кімнатній температурі.

Проведені дослідження по впливу халькогенідної обробки на механізми проходження струмів діодів на основі *GaAs* показали немонотонний характер змін надлишкових і рекомбінаційних прямих струмів, а також зворотних струмів у предпробійній області при збільшенні тривалості обробки. Причиною цього є немонотонний характер змін щільності поверхневих станів після халькогенідної обробки різної тривалості. Результати проведеного дослідження показують, що сульфідна обробка більш ефективна ніж селенідна, і дозволяють оптимізувати тривалість обробки для отримання найбільшого покращення вольт-амперних характеристик діодів на основі *GaAs*.

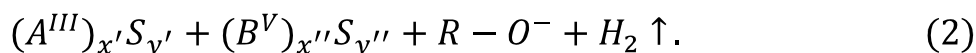
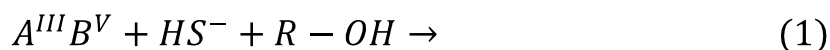
# 1. ВЛАСТИВОСТІ P-N ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКІВ ГРУПИ $A^{III}B^V$ З ХАЛЬКОГЕНІДНОМОДИФІКОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

## 1.1. Формування халькогенідного пасивуючого покриття

Напівпровідникові структури на основі напівпровідників групи  $A^{III}B^V$  є одними із основних для використання у сучасній мікро- та наноелектроніці. Подальше використання цих елементів стримується високою щільністю поверхневих станів, які суттєво впливають на характеристики напівпровідникових приладів. Використання халькогенідної пасивація дозволяє суттєво зменшити щільність поверхневих станів і знизити швидкість поверхневої рекомбінації. Це призводить до суттєвого покращення характеристик різних напівпровідникових приладів, а також, що дуже важливо, вповільнює деградаційні процеси, які пов'язані з процесами окислення напівпровідникової поверхні в атмосфері.

Халькогенідна пасивація може здійснюватися в газових атмосферах або в розчинах сульфідних або селенідних сполук. Розглянемо особливості формування халькогенідного покриття [1].

У загальному вигляді хімічну реакцію утворення сульфідного покриття з розчинів неорганічних сульфідів можна записати наступним чином.



Тут  $R$  означає або атом водню (для водних розчинів), або алкільну групу (для спиртових розчинів).

У процесі халькогенідної обробки поверхні арсенід галію окислюється, а водень відновлюється. Це дозволяє віднести хімічні реакції при халькогенідній обробці до окислювально-відновлюваних.

Реакція формування халькогенідного покриття є фотоелектрохімічною, тобто такою, яка відбувається лише при освітленні. Швидкість утворення халькогенідного покриття залежить від температури, при якій здійснюється модифікація поверхні, та інтенсивності падаючого світла, а також від концентрації халькогенідних іонів у розчині або в халькогенідній атмосфері.

Автори [2] запропонували модель, яка враховує вплив жорсткості розчинів на властивості сульфідованої поверхні напівпровідника  $A^{III}B^V$ . Згідно з моделлю, щільність поверхневих станів після халькогенідної обробки зменшується більш суттєво при збільшенні глобальної жорсткості електронної оболонки іонів халькогенів у розчиннику.

Дослідження показують, що всі покращення характеристик арсеніду галію з часом деградують при зберіганні в повітрі. Для розділення впливу кисню в повітрі і освітлення на халькогенідномодифіковану поверхню у роботі [2] були проведені дослідження характеристик  $GaAs$  після халькогенідної обробки в спиртових розчинах. Було з'ясовано, що зберігання зразків у кисні в темряві або при освітленні у вакуумі не призводять до деградації їх характеристик. У той же час зберігання обробленого  $GaAs$  тривалістю 40-хвилин у кисні при освітленні призвело до утворення великої кількості оксидів. Виявилося, що швидкість окислення сильно залежить від кристалографічної орієнтації поверхні. Швидкості окислення галію і миш'яку теж виявилися різною, а саме галій окислювався швидше, ніж миш'як. Дослідження, проведені у роботі [2], показали більшу стійкість селенових зв'язки до фотоокислення, ніж у зв'язків із сіркою.

У роботі [3] за допомогою різних рентгенівських методів показано, що на поверхні *GaAs* після сульфідної обробки у розчинах з'являється шар аморфної сірки, під яким знаходиться сульфідне покриття *GaS*.

Проведення відпалу поверхні *GaAs*, сульфидованої з різних розчинів, видаляло шар аморфної сірки. Згідно до запропонованої авторами [4] теоретичної моделі, після відпалу з поверхні практично зникають зв'язки *As-S* і залишаються тільки зв'язки *Ga-S*. У той же час проведення відпалу при більш високих температурах ( $T > 900$  K) повністю видаляло атоми сірки з поверхні [5].

У роботі [7] проведено дослідження селенідної обробки на властивості поверхні арсеніду галію. Селен лежить на поверхні *GaAs* (100) і, як і сірка, утворює після відпалу структуру  $(2 \times 1)$ . При осадженні селену на чисту поверхню *GaAs*  $(4 \times 6)$  структура поверхні змінюється послідовно від  $(4 \times 6)$  до  $(4 \times 3)$ , далі  $(2 \times 3)$  і, нарешті, виходить стабільна поверхня  $(2 \times 1)$ .

Деякі автори [1, 6, 7] вказують на те, що халькогенідна обробка може призводити до зростання поверхневої забороненої зони.

## **1.2. Вплив халькогенідної обробки поверхні на властивості напівпровідників**

Важливим застосуванням халькогенідної модифікації поверхні є підготовка поверхні підкладок напівпровідників  $A^{III}B^V$  до епітаксialного нарощування.

Як правило, для підготовки поверхні використовується відпал поверхні підкладки у надвисокому вакуумі при високих температурах, більших за температуру десорбції поверхневих оксидів. Однак це не завжди можна легко зробити. Яскравим прикладом може слугувати халькогенідна обробка антимонід індію [8]. Температура десорбції оксиду індію з антимоніду індію помітно перевищує температуру плавлення *InSb*. Таким чином, використовувати відпал стає неможливим. Чистий *InSb* має

високу реакційну здатність, тому хімічне травлення оксидного шару також немає сенсу, оскільки повторне окислення попередньо очищеної поверхні відбувається навіть при короткотривалій витримці у повітрі. У таких випадках зручно використовувати халькогенідну обробку, яка дозволяє видалити шар природного оксиду з поверхні напівпровідника і формує на поверхні шар сульфідів індію і сурми при сульфидуванні або шар селенідів індію і сурми при селенідній обробці. Халькогеніди індію та сурми десорбуються при нижчих температурах, ніж відповідні оксиди. У роботі [8] виявлено, що у вакуумі при температурі  $360^{\circ}\text{C}$  захисний шар сульфідів індію вже десорбується, а десорбція оксидів з необробленого *InSb* починалася при набагато вищій температурі, яка складала  $430^{\circ}\text{C}$ .

Проведені в [9] дослідження показали, що за сульфідна обробка у водному розчині сульфиду натрію суттєво знижує щільність дефектів на інтерфейсі підкладки *GaAs(100)* та шару *ZnSe*, а також підкладки *InAs* та шару *CdMgSe*.

Поширеним варіантом селенідної обробки є обробка водним розчином  $(\text{NH}_4)_2\text{Se}$  [9]. За допомогою такої обробки на поверхні арсеніду індію вдалося отримати бездефектні шари селенідів цинку та кадмію.

Халькогенідна обробка є перспективною і для нанорозмірних структур. Автори [9] використали обробку у водному розчині  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  для видалення шару природних оксидів з поверхні нанодротів *InSb*, на основі яких створюються балістичні надпровідні елементи для квантових комп'ютерів.

При сульфідній обробці *GaAs* у водних розчинах спостерігалось суттєве зростання стабільності їх фотолюмінесцентних характеристик. Як з'ясувалося, рівень покращення фотолюмінесцентних властивостей суттєво залежить від рівня легування напівпровідника. На рис.1 показано залежність відносного зростання інтенсивності фотолюмінесценції *GaAs* до та після сульфідної обробки в залежності від концентрації донорів у

матеріалі [1.9]. Аналіз даних наведених на рис. 1 показує, що більш ефективна така обробка для слабологованих матеріалів.

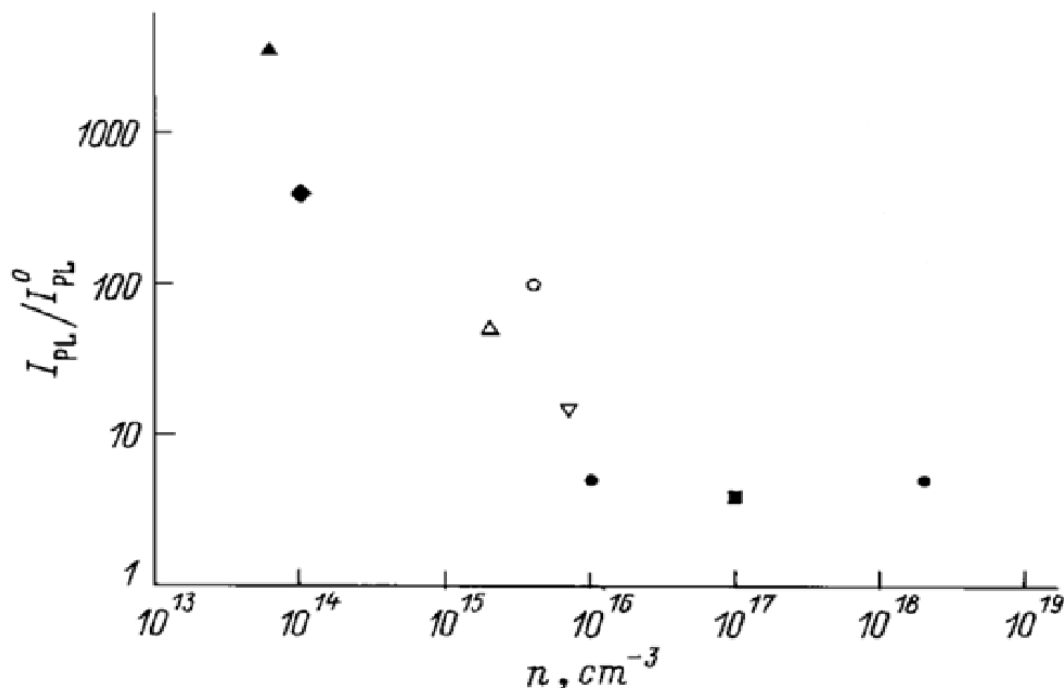


Рис. 1. Зростання відносної інтенсивності фотолюмінесценції GaAs, після сульфідної обробки у водних сульфідних розчинах ( $I_{PL}$ ), по відношенню до інтенсивності фотолюмінесценції вихідного GaAs ( $I_{PL}^0$ ) в залежності від рівня легування [1.9].

### 1.3. Застосування халькогенідної обробки

#### для покращення характеристик напівпровідникових приладів

При виготовленні напівпровідникових приладів обов'язково враховуються стани поверхонь і меж розділу [10]. Зокрема, для польових транзисторів з бар'єром Шотки контролюється висота бар'єру Шотки. У



МДН транзисторах обов'язково враховуються положення рівня Фермі на поверхні та щільність поверхневих та інтерфейсних станів. Висока щільність поверхневих станів у забороненій зоні є характерною для реальної поверхні всіх напівпровідників  $A^{III}B^V$ . Наслідком наявності високої щільності поверхневих станів є закріплення рівня Фермі на поверхні. Це перешкоджає управлінню поверхневим бар'єром і, отже, ускладнює створення якісних приладів на цих напівпровідниках.

Халькогенідна обробка поверхні різних напівпровідників групи  $A^{III}B^V$  та твердих розчинів на їх основі суттєво зменшувала щільність поверхневих станів, що в свою чергу призводило до менш жорсткого закріплення рівня Фермі на поверхні [1]. В цьому випадку вже стає можливою залежність висоти бар'єри від роботи виходу металу. Крім суттєвого збільшення висоти бар'єру, в структурах  $Au/n-InGaAs$  спостерігалось ще і зростання фоточутливості. Спектр поверхневих станів  $n-GaAs$ , отриманих з аналізу темнових вольт-фарадних характеристик діодів Шоттки на основі  $GaAs$ , показав наявність у забороненій зоні двох поверхневих станів: один на відстані 0.6 eV від дна зони провідності, а інший на відстані 0.5 eV від границі валентної зони. Автори [11] довели, що обробка у водних розчинах призводить головним чином до зниження щільності глибоких поверхневих центрів, у той час як щільність дрібних поверхневих центрів може навіть збільшуватися.

Зниження щільності електронних станів внаслідок халькогенідної пасивації поверхні напівпровідника використовується і для виготовлення МДН структур [1]. Халькогенідна обробка призводила до підвищення термічної стабільності границі розділу провідник / діелектрик і покращення високочастотних характеристик МДП структур на основі  $GaAs$ .

Крім зниження щільності поверхневих станів халькогенідна обробка призводить до зниження швидкості поверхневої рекомбінації. Це дозволяє

суттєво покращити характеристики фотоструктур. У сонячних елементів з тонким емітером на основі *GaAs* халькогенідна обробка призводила до зростання фотоструму, збільшення фоточутливості, особливо в короткохвильовій області спектру, і зменшення обернених струмів. При цьому спостерігалось суттєве зниження швидкості поверхневої рекомбінації з  $5 \cdot 10^6$  до  $10^3$  см/с [1].

Автори [10] проводили обробку *InGaAsP*-лазерів у водному розчині сульфиду амонію. Наслідком такої обробки стало зростання їх електронадійності до перевантаження по напрузі. Проведена обробка дзеркал цих лазерів у спиртовому розчині сульфиду амонію зменшила їх шуми і підвищила поріг катастрофічної оптичної деградації від 25% до 50% у різних лазерах.

При молекулярно – пучкової епітаксії з металорганічних сполук підготовку поверхні напівпровідника можна проводити за допомогою хімічного газового травлення. Однак таке травлення має свої недоліки.. Максимально досягнута концентрація носіїв на інтерфейсі може докорінно змінити форму потенціалу в приладі. Халькогенідна обробка таких структур дозволяє зарощувати шари твердих розчинів на високу швидкість окислення. Це пов'язано з тим, що халькогенідна обробка не тільки знімає поверхневі оксиди, а й одночасно формує захисне покриття

#### **1.4. Деградація характеристик напівпровідникових приладів після халькогенідної обробки поверхні**

Важливо не тільки покращити характеристики напівпровідників і напівпровідникових приладів, але й досягти стійкого, довготривалого ефекту. Для подальших застосувань халькогенідної пасивації необхідно

забезпечити довготривалу стабільність всіх покращених електронних властивостей пасивованих гетеромеж і приладів.

Перше успішне застосування сульфідної пасивації було виконано для покращення характеристик біполярного транзистора  $GaAs/AlGaAs$ . Підвищення коефіцієнтів посилення по струму, по напруженню і по потужності спостерігалися протягом кількох днів після сульфидування [12].

Для відповіді на питання, чому цей ефект спостерігався лише кілька днів, у подальшому були проведені дослідження фотолюмінесцентних властивостей  $GaAs$ , який був оброблено у водному розчині сульфиду натрію. Проведені дослідження показали, що під дією збуджуючого випромінювання фотолюмінесцентні характеристики  $GaAs$  деградували протягом півгодини [13]. Ці результати підтверджують висновки авторів роботи [14], в якій стверджувалося, що основним механізмом, який призводить до погіршення різних властивостей напівпровідників  $A^{III}B^V$  та приладів на їх основі, є деградація властивостей самого халькогенідного покриття, а саме його є фотоокислення.

Рішення проблеми деградації халькогеніднообробленої поверхні лежить у двох площинах. По перше, оброблені халькогенідними розчинами структури можна зберігати і використовувати в фотоізолюваних корпусах. По друге, можна підібрати більш ефективний розчин або іншу технологію халькогенідної обробки.

У роботі [2] підвищення стабільності халькогеніднообробленої поверхні  $GaAs$  відбулося при застосуванні електрохімічної пасивації та пасивації у спиртових розчинах. Фотолюмінесцентні властивості поверхні, сульфидованої цими методами, залишалися стабільними навіть під дією потужного лазерного випромінювання. Дзеркала лазері, оброблені такими методам, показали більшу стійкість навіть до катастрофічної оптичної деградації.

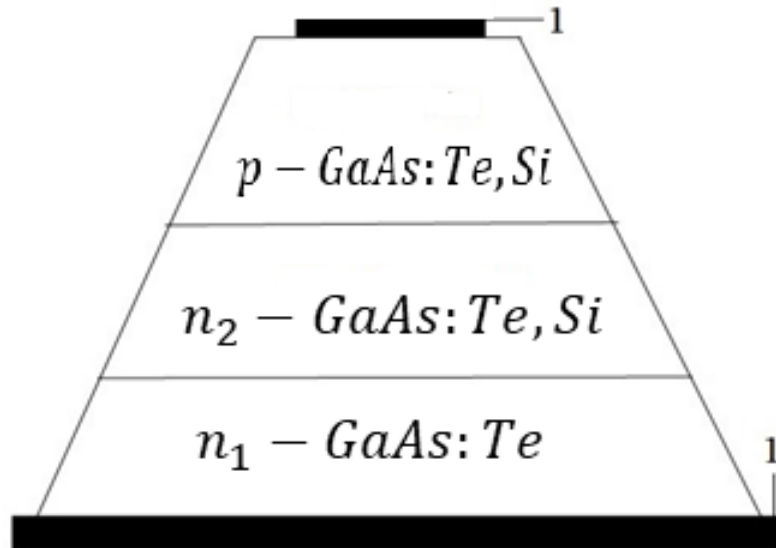
Перспективним методом підвищення стабільності властивостей халькогеніднообробленої поверхні є нанесення на неї шара діелектрика. Автори [15] проводили сульфідовання поверхні мікродискових лазерних структур *GaAs/AlGaAs* у водному розчині сульфїду амонїю. До повного повернення до початкових характеристик ці структури після сульфїдної обробки працювали лише 2 хвилини, але захист поверхні цих лазерів шаром *SiN*, призвів до того, що покращені характеристики залишалися стабільними протягом усього періоду дослідження, який складав майже 2 роки.

## 2. ВПЛИВ РЕЖИМІВ ХАЛЬКОГЕНІДНОЇ ОБРОБКИ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ *P-N* ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ *GaAs*

### 2.1. Структура діодів на основі арсеніду галію і методика вимірювання електричних характеристик у повітрі

Структура досліджених промислових діодів на основі *GaAs* наведена на рис.2. У якості підкладки використовувався арсенід галію *n*-типу, легований телуrom. На підкладку при високих температурах епітаксійно нарощується шар *n<sub>2</sub>-GaAs*, який легується телуrom і кремнієм з концентраціями  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Кремній в *GaAs* проявляє амфотерні властивості. При високих температурах епітаксійного нарощування він заміщує в ґратці *GaAs* сам галій і виступає в якості донора. Тому в шарі *n<sub>2</sub>*, який нарощувався на підкладку при високих температурах, кремній був донорною домішкою. При зниженні температури нарощування кремній заміщує в ґратці *GaAs* миш'як і проявляє акцепторні властивості. Використання амфотерних властивостей кремнію – поширена практика у створенні *p – n* переходів на основі *GaAs*. Після епітаксійного нарощування шару *n<sub>2</sub>* для створення *p*-області температуру зразків спеціально знижують до так званої температури інверсії, при якій атоми кремнію входять виключно у підґратку миш'яку і виступають в якості акцепторної домішки. Це призводить до появи шару *p*-типу та утворенню *p – n* переходу. У досліджених структурах *p-n* перехід був паралельним площині (100).

Омічні контакти до отриманих таким чином *p – n* переходів створювалися нанесенням сплаву *Au-Ni*. Вони показані на рис. 2 цифрою 1.



*Рис.2. Схематичне зображення структури промислових діодів на основі арсеніду галію: 1 – омичні контакти.*

Стационарні вольт-амперні характеристики (ВАХ) прямого і оберненого струмів вимірювалися у повітрі при кімнатній температурі до та після проведення халькогенідної обробки поверхні діодів на основі *GaAs*. Принципова схема установки для вимірювання малих струмів представлена на рис.3.

Напруга на діод подавалася від стабілізованого джерела напруги (ДН). Згідно з представленою схемою, напруга на діоді буде дорівнювати:

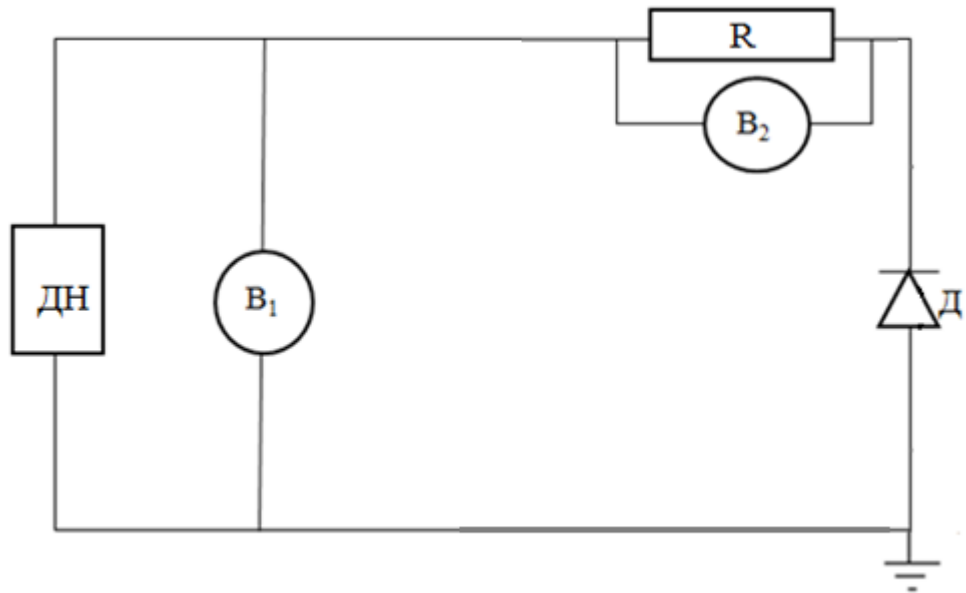
$$U_D = U_I - U_R, \quad (3)$$

де  $U_I$  напруга на ДН,  $U_R$  – падіння напруги на відомому опорі  $R$ .

Струм, який проходить через діод, дорівнює струму, що проходить через послідовно включений опір  $R$ . За законом Ома величина струму дорівнює

$$I_R = \frac{U_R}{R}, \quad (4)$$

де  $U_R$  – напруга, що падає на відомому опорі  $R$ .



*Рис.3. Принципова схема установки  
для вимірювання ВАХ діодів в області малих струмів*

В якості джерела напруги використовувався прилад - джерело живлення стабілізоване, в якості вольтметра  $V_1$  – вольтметр універсальний В7 – 21, в якості вольтметра  $V_2$  – прилад комбінований цифровий Щ4300. Величина опору  $R$  встановлювалася перемикачем і приймала дискретні значення  $10$ ;  $10^2$ ;  $10^3$ ;  $10^4$ ;  $10^5$  Ом.

Халькогенідна обробка поверхні діодів на основі  $GaAs$  проводилася у водних розчинах сульфідів або селенідів натрію. За даними роботи [1], в цьому випадку утворюються більш стійкі зв'язки галію з халькогенідними атомами, а швидкість утворення пасивуючого покриття менша, ніж у спиртових розчинах. Це дозволяє краще відслідковувати зміни ВАХ, особливо при короткотривалих обробках. Додаткове сповільнення процесу халькогенідної пасивації досягалося за рахунок зменшення концентрації

іонів у розчині. Представлені результати були отримані після модифікації поверхні атомами сірки або селену у 30 % водних розчинах сульфідів натрію або селенідів натрію при освітленні сфокусованим світлом від лампи розжарювання. Після халькогенідної обробки діоди промивалися у дистильованій воді. Для видалення залишків води з поверхні діоди додатково просувалися у потоці повітря.

## 2.2. Вплив халькогенідної обробки на ВАХ прямого і оберненого струмів $p-n$ – переходів на основі $GaAs$

Наведені нижче результати представлені в нашій публікації [17].

На рис. 4 і 5 показано ВАХ прямого струму  $p-n$ -переходів на основі  $GaAs$  до та після сульфідної обробки тривалістю 20с і 40с.

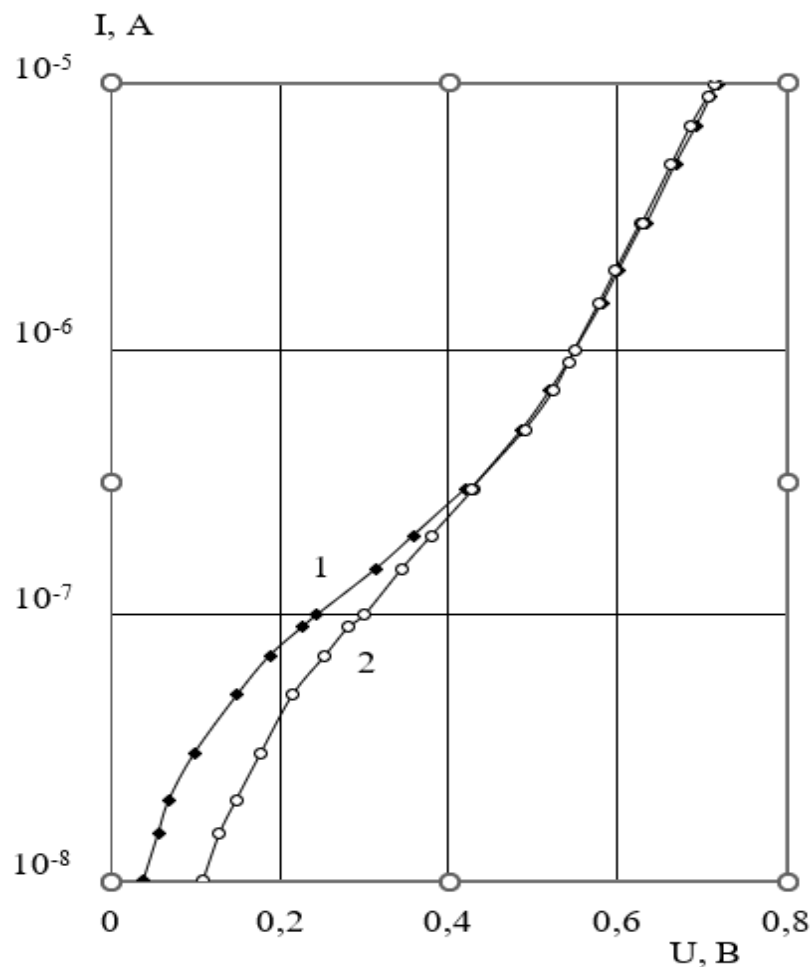


Рис. 4. ВАХ прямого струму  $p-n$  переходу на основі  $GaAs$  до (1) та після (2) сульфідної обробки поверхні тривалістю 20 с у 30 % водному розчині [17].



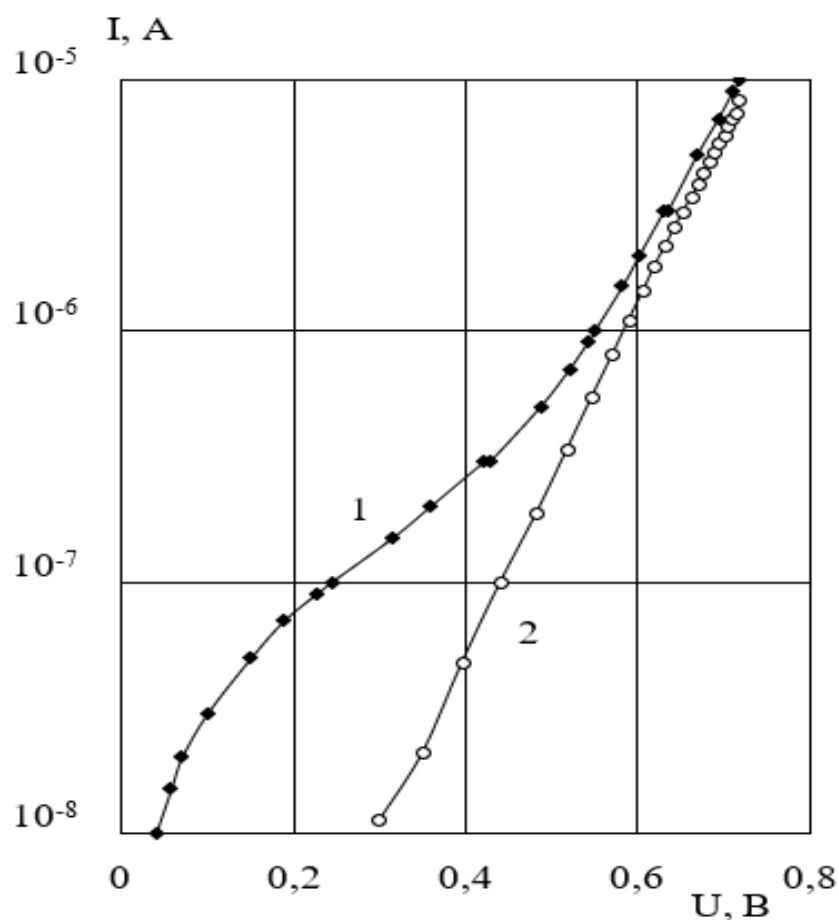


Рис. 5. ВАХ прямого струму  $p$ - $n$  переходу на основі GaAs до (1) та після (2) сульфідної обробки поверхні тривалістю 40 с у 30 % водному розчині [17].

На рис. 6 і 7 показано ВАХ прямого струму  $p$ - $n$ -переходів на основі GaAs до та після селенідної обробки у 30 % водному розчині  $Na_2Se$  тривалістю 20с і 40с при кімнатній температурі.

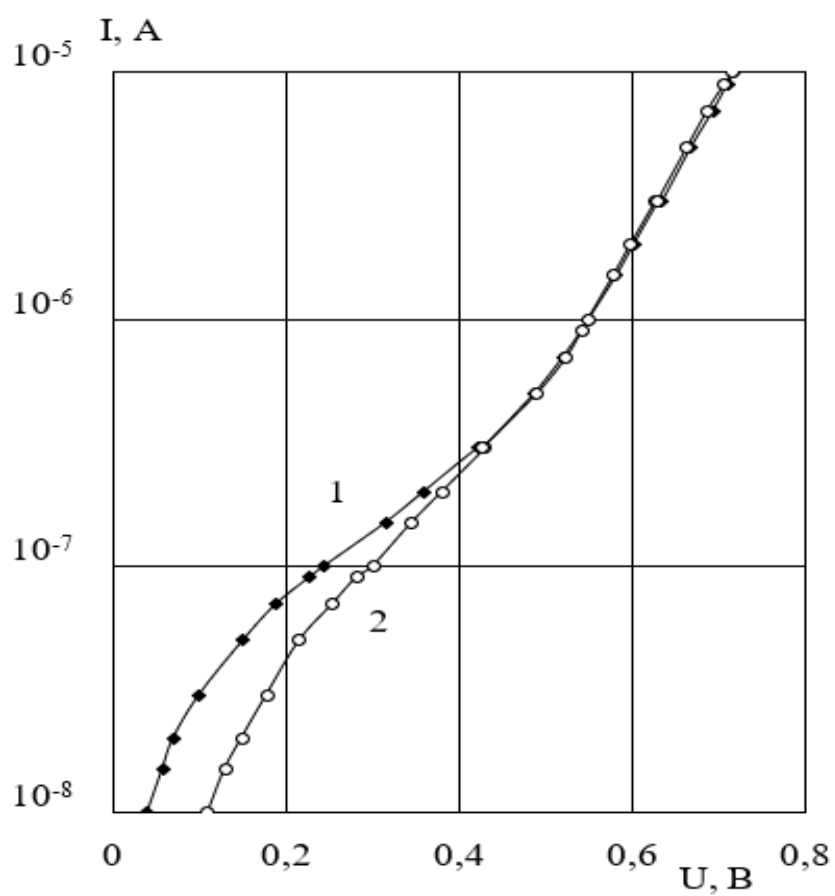


Рис. 6. ВАХ прямого струму р-п переходу на основі GaAs до (1) та після (2) селенідної обробки поверхні тривалістю 20 с у 30 % водному розчині [17].

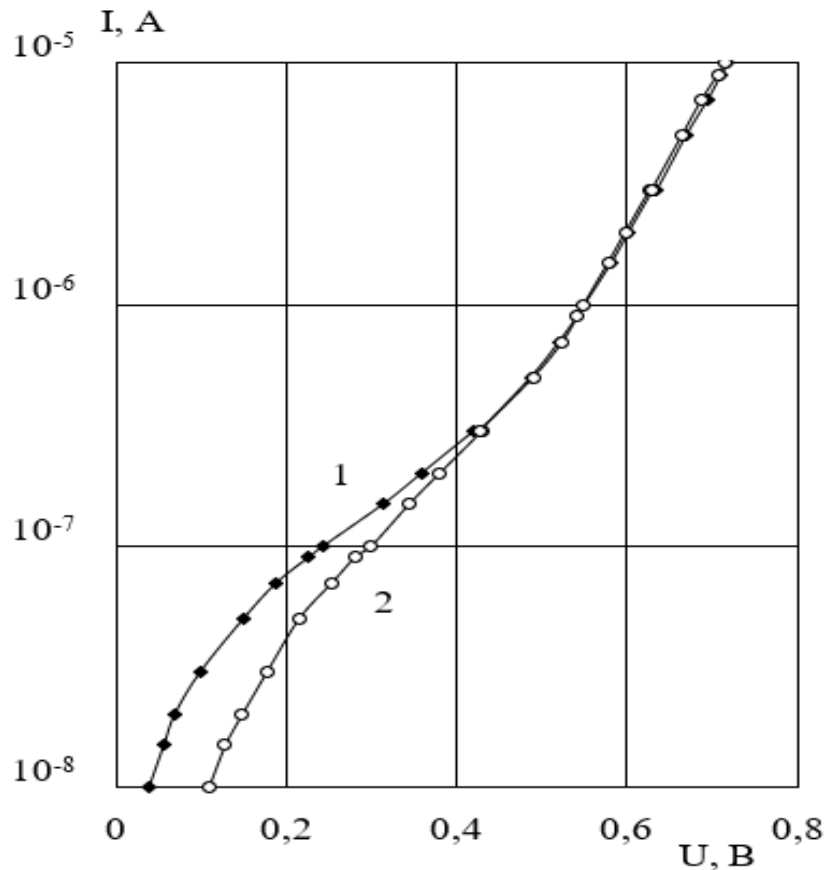


Рис. 7. ВАХ прямого струму  $p$ - $n$  переходу на основі  $GaAs$  до (1) та після (2) селенідної обробки поверхні тривалістю 40 с у 30 % водному розчині [17].

У таблиці 1 наведено результати аналізу механізмів проходження прямих струмів у  $p$ - $n$ -переходах на основі  $GaAs$  для різних областей струмів.

Порівняння ВАХ прямих струмів  $p$ - $n$ -переходів до та після короткотривалої халькогенідної обробки показує, що зменшуються надлишкові струми, як при сульфідній, так і при селенідній обробках. Треба відмітити, що сульфідна обробка більше зменшувала надлишкові струми, ніж селенідна як при 20 с обробки, так і при 40 с обробки, що свідчить про її

більшу ефективність для покращення електричних властивостей *p-n*-переходів на основі *GaAs*.

Таблиця 1. Результати аналізу механізмів проходження прямих струмів у *p-n*-переходах на основі *GaAs*.

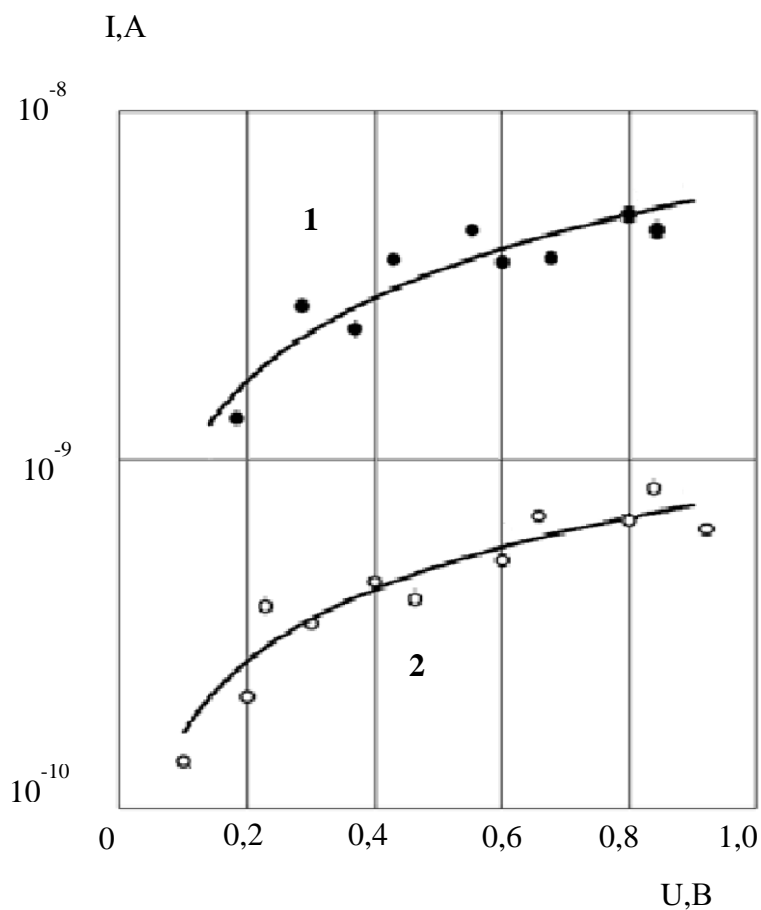
	Область прямих струмів	Струм	
1	$10^{-8} \text{ А} < I < 10^{-6} \text{ А}$	Надлишкові струми	$I = I_{01} \exp \alpha U$
2	$10^{-6} \text{ А} < I < 10^{-4} \text{ А}$	Тунельно-рекомбінаційні струми	$I = I_{02} \exp qU/nkT$ $n \geq 2$
3	$10^{-4} \text{ А} < I < 10^{-2} \text{ А}$	Дифузійні (інжекційні) струми	$I = I_{03} \exp qU/nkT$ $n \approx 1$

На тунельно-рекомбінаційні струми сульфідна та селенідна обробки тривалістю 20 с і 40 с майже не впливали.

В області прямих струмів  $10^{-4} < I < 10^{-2} \text{ А}$  на ВАХ спостерігалися так звані дифузійні (інжекційні) струми. Ці струми обумовлені рекомбінацією носіїв заряду у квазінейтральних областях. Коефіцієнт неідеальності для ВАХ дифузійних струмів дорівнює одиниці. Проведені нами дослідження показали, що на величини дифузійних струмів сульфідна та селенідна обробки тривалістю 20 с і 40 с не впливали.

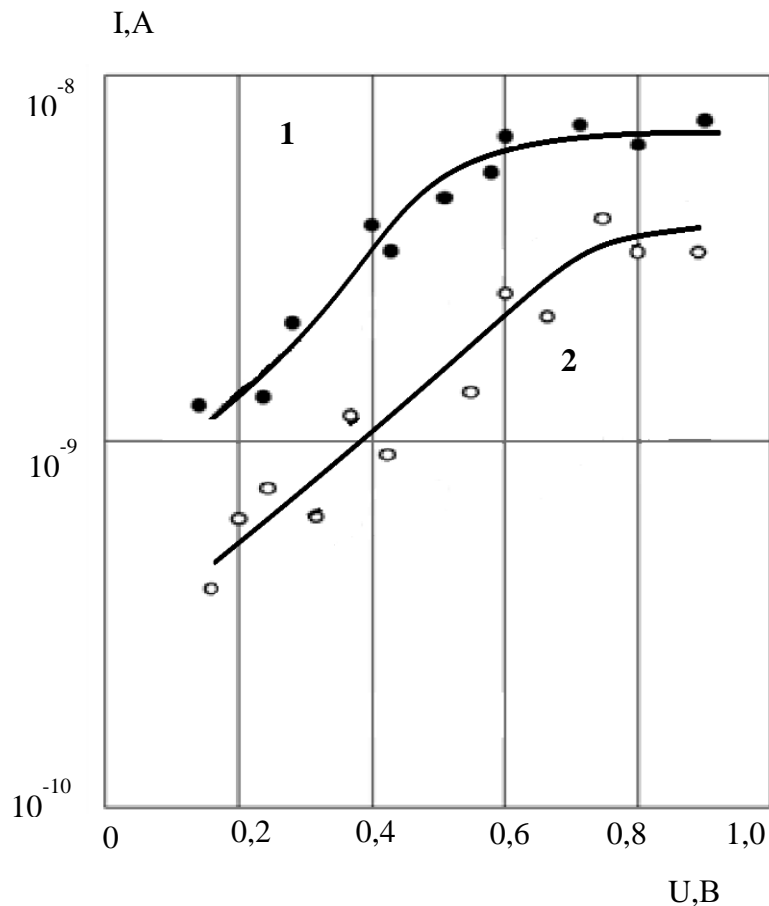
Зменшення прямих струмів після халькогенідної обробки можна пояснити зменшенням густини поверхневих станів (ПС) межі розділу *p* - та *n*- областей, яке відбувається після видалення поверхневих оксидів та утворення зв'язків халькоген - галій.

На рис. 8 показано ВАХ оберненого струму до (крива 1) та після сульфідної обробки тривалістю 40 с (крива 2).



*Рис. 8. ВАХ оберненого струму р-п переходу на основі GaAs: 1 – до обробки; 2 – після сульфідної обробки поверхні тривалістю 40 с у 30 % водному розчині .*

На рис. 9 показано ВАХ оберненого струму до (крива 1) та після селенідної обробки тривалістю 40 с (крива 2).



*Рис. 9. ВАХ оберненого струму  $p-n$  переходу на основі  $GaAs$ : 1 – до обробки; 2 – після селенідної обробки поверхні тривалістю 40 с у 30 % водному розчині .*

Аналіз ВАХ обернених струмів  $p-n$  переходів на основі  $GaAs$ , які були виміряні в повітрі до та після проведення халькогенідної обробки поверхні, показав зменшення струмів і у предпробійній області. Наші дослідження [16] показали, що цей ефект, як і у випадку з прямими струмами, був більш суттєвим при сульфідній обробці поверхні за умови однакової тривалості процесу сульфідної та селенідної обробок. Зменшення обернених струмів після халькогенідної обробки поверхні також можна пояснити зменшенням густини ПС  $p-n$  переходів.

### 2.3 Вплив тривалості халькогенідної обробки на ВАХ *p*-переходів на основі *GaAs*

Величина зменшення струму після халькогенідної обробки поверхні розраховувалася при фіксованій напрузі за формулою

$$\Delta I = I_1 - I_2, \quad (9)$$

де  $I_1$  – початкова величина струму,  $I_2$  – величина струму після обробки поверхні.

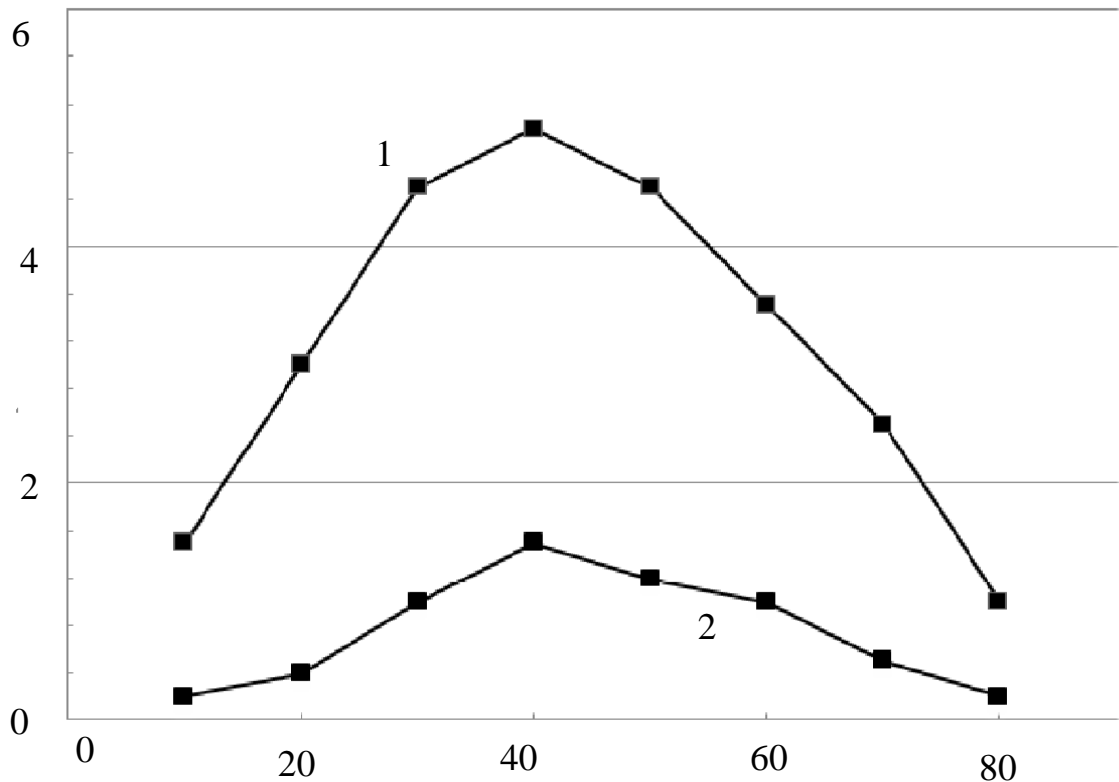
На рис. 10 наведено залежності змін прямих струмів *p-n* переходів на основі *GaAs* при напрузі  $U = 0,3V$  від тривалості халькогенідної обробки при кімнатній температурі у 30 % водних розчинах. Крива 1 отримана після обробки у розчині сульфиду натрію. Крива 2 отримана після обробки у розчині селеніду натрію. Криві отримані після усереднення змін прямих струмів 5 зразків для кожного режиму обробки.

Залежності величини зменшення оберненого струму від тривалості халькогенідних обробок поверхні мали подібний вигляд.

Аналіз змін прямих та обернених струмів показав, що при збільшенні тривалості халькогенідних обробок величини  $\Delta I$  спочатку зростали, досягали свого максимального значення, а потім починали зменшуватися. Таким чином довготривала халькогенідна обробка зменшувала ефект покращення ВАХ.

Для пояснення змін прямих і обернених струмів від тривалості халькогенідної обробки  $\Delta I(t)$  необхідно врахувати всі процеси, які відбуваються на поверхні. Збільшення тривалості обробки призводить не тільки до більш повного видалення поверхневих оксидів, а й до утворення і суттєвого зростання товщини діелектричного шару, утвореного галієм з

відповідним халькогеном, що супроводжується змінами спектра і густини ПС  $p-n$  переходів.



*Рис. 10. Залежності змін прямих струмів  $p-n$  переходів на основі GaAs при напрузі  $U = 0,3В$  від тривалості халькогенідної обробки при кімнатній температурі у 30 % водних розчинах:  
1 – сульфиду натрію, 2 – селеніду натрію.*

Збільшення товщини діелектричного шару галій – халькоген може привести до збільшення послідовного опору квазінейтральних областей. На ВАХ прямого струму це повинно відобразитися при високих рівнях інжекції, коли значна частина прикладеної прямої напруги починає падати саме на послідовному опорі. Проведені нами дослідження [17] показали,



що при халькогенідній обробці поверхні з тривалістю до 100 с ВАХ при високих рівнях інжекції не змінювалися. Це означає, що величини послідовного опору  $p$ - $n$  переходів на основі  $GaAs$  після халькогенідної обробки залишалися сталими.

Необхідно врахувати, що зростання товщини діелектричного шару при халькогенідній обробці модифікації відбувається не тільки на поверхнях, які є компланарними до епітаксiальної поверхні, а й на торцях діодів. Незмінність послідовного опору означає, що основну роль у змінах струмів при довготривалій обробці можуть відігравати процеси саме на торцевих поверхнях діодів [16].

При малих тривалостях обробки внаслідок зменшення густини поверхневих станів межі розділу  $p$  - та  $n$ - областей загальний струм буде зменшуватися, що і спостерігалось експериментально[17]. При збільшенні тривалості обробки товщина шару  $Ga_2S_3$  при сульфідній обробці, як і товщина шару  $Ga_2Se_3$  при селенідній обробці суттєво зростають.

У таблиці 2 наведено параметри кристалічних ґраток  $Ga_2S_3$  і  $Ga_2Se_3$  [14].

Таблиця 2. Параметри кристалічних ґраток арсеніду галію, сульфїду галію та селенїду галію.

Хімічна формула	Тип ґратки	Параметри кристалічної ґратки		
		a	b	c
$GaAs$	кубічна гранецентрована	0.5653		
$Ga_2S_3$	гексагональна	0,3678	0,6016	0,667
$Ga_2Se_3$	гексагональна	0,5422	0,8868	1,03

Внаслідок неузгодженості параметрів кристалічних ґраток цих утворень та об'ємного  $GaAs$  при збільшенні товщин діелектричних шарів  $Ga_2S_3$  і  $Ga_2Se_3$  з'являються додаткові механічні напруження. Це приводить до збільшення густини поверхневих станів  $p-n$  переходів і буде супроводжуватися зростанням струмів закортоток. Тому при збільшенні тривалості халькогенідної обробки поверхні подальше покращення ВАХ не буде відбуватися, що і спостерігалось нами на експерименті[16]. Внаслідок цих процесів на залежностях величин зменшення прямих та обернених струмів від тривалості сульфідної і селенідної обробок поверхні спостерігалися максимуми величин  $\Delta I$ , після яких починалося зменшення змін струмів, а отже і зменшення ефекту покращення ВАХ оброблених діодів.

## ВИСНОВКИ

1. Халькогенідна обробка *p-n*-переходів на основі *GaAs* при кімнатній температурі у 30 % водних розчинах тривалістю до 40с при освітленні зменшує щільність поверхневих станів, що призводить до зменшення надлишкових і рекомбінаційних прямих струмів і зворотних струмів у предпробійній області.
2. Халькогенідна обробка при кімнатній температурі у 30 % водних розчинах тривалістю більше 40 с при освітленні зменшувала покращення електричних властивостей *p-n*-переходів на основі *GaAs*. В той же час довготривала халькогенідна обробка не змінювала вольт-амперні характеристики структур в області високих рівней інжекції, що є свідченням незмінності послідовного опору досліджених діодів.
3. Незмінність послідовного опору діодів на основі арсеніду галію до та після халькогенідної обробки свідчить про зменшення густини поверхневих станів на торцях структур поблизу збідненого шару.
4. Оптимальною тривалістю халькогенідної обробки *p-n*-переходів на основі *GaAs* при кімнатній температурі у 30 % водних розчинах є 40 с, при якій максимально зменшується щільність поверхневих станів.
5. Проведені нами дослідження показують перевагу обробки у водному розчині сульфіді натрію перед обробкою у водному розчині селеніду натрію для покращення вольт-амперних характеристик *p-n*-переходів на основі *GaAs*.

Автор \_\_\_\_\_

## ЛІТЕРАТУРА

1. Lebedev M. V. Modification of the atomic and electronic structures of the surface of  $A^{III}B^V$  semiconductors at the interface with electrolyte solutions / M. V. Lebedev // *Physics and Technology of Semiconductors*. – 2020. – Vol. 54 (7). – P. 699-741 – 1063782620070064.
2. Ghita R. V. On the passivation of GaAs surface by sulfide compounds / R. V. Ghita, C. C. Negri, C. Cotirlan, C. Logofatu // *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. – 2013. – Vol. 8 (3). – P.1335-1344.
3. Ho C.-H. Optically decomposed near-band-edge structure and excitonic transitions in  $Ga_2S_3$  / C.-H. Ho, H.-H. Chen // *Nature: Scientific Reports*. – 2014. – Vol. 4. – 06143.
4. Jastrzebski C. Synthesis and structural characterization of microcrystalline  $Ga_2S_3$  layers on a  $GaP$  semiconductor substrate / C. Jastrzebski, D. J. Jastrzebski, V. Kozak, K. Pietak, M. Wierzbicki, W. Gebicki // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2019. – Vol. 94. – P. 80-85.
5. Tajik N. Sulfur passivation and contact methods for GaAs nanowire solar cells / N. Tajik, Z. Peng, P. Kuyanov, R. R. LaPierre // *Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 22. – 225402.
6. A.G. Voloshchuk Thermodynamic Analysis of Cadmium Telluride Interaction with the Solutions of the  $Na_2S - NaOH - H_2O$  System. / A.G. Voloshchuk, E.M. Lukiyanchuk. // *Phys. Chem. Solid*. – 2004. – Vol. 5 – No 4 – P. 799-803.
7. Xu. Y. Effects on the Surface and Luminescence Properties of GaAs by SF 6 Plasma Passivation / Y. Xu, X. Gao, X. Zhang, Z. Qiao, J. Zhang, L. Zhou, B. Bo // *Crystals*. – 2018. — Vol. 8. – P. 339 – 8090339.
8. Lvova T. V. Chemical Passivation of InSb (100) Substrates in Aqueous Solutions of Sodium Sulfide / T. V. Lvova, M. S. Dunaevskii, M. V. Lebedev,

- A. L. Shakhmin, I. V. Sedov, S.V. Ivanov // *Semiconductors*. – 2013. – Vol. 47 (5). – 106378261305014.
9. Tajik N. Improved conductivity and long-term stability of sulfur-passivated *n-GaAs* nanowires / N. Tajik, A. C. E. Chia, R. R. LaPierre // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 100. – 203122.
  10. Malyutenko V. K. Current crowding effect on the ideality factor and efficiency droop in blue lateral *InGaN/GaN* light emitting diodes / V. K. Malyutenko, S. S. Bolgov, and A. D. Podoltsev // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 97. – 251110.
  11. Wu. J. Strong sulfur passivation effects on the gas sensitivity of an *In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As* surface quantum dots coupling structure / J. Wu, Y. Yang, Z. Liu, G. Wang // *Journal of Crystal Growth*. – 2021. – Vol. 560–561. – P. 126058.
  12. Bezsolov V. N. Chalcogenide passivation of semiconductor surfaces. Review / V. N. Bezsolov, M. V., Lebedev // *Physics and Technology of Semiconductors*. – 1998. - Vol. 32 (11). – P. 1141-1156 – 1187580.
  13. Masui H. Technique to evaluate the diode ideality factor of light-emitting diodes / H. Masui, S. Nakamura, S. P. DenBaars // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 96. – 073509.
  14. Cheng. K. Y. III–V Compound Semiconductors and Devices / K. Y. Cheng. – Springer, 2020 – P. 537.
  15. Матвеева Л. О. Структурна досконалість і електронні параметри сульфидованої поверхні арсеніду галію / Л.О. Матвеев, О. Ю. Колядіна, І.М. Матіюк, О.М. Міщук // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2006. – Т. 7 (3). – С. 461-467.
  16. Маслеева Н.В., Вплив режимів сульфідної модифікації поверхні на механізми проходження струмів у *p-n* переходах на основі *GaAs* / Маслеева Н.В., Богдан О.В., Брітавський І.В., Тарасевич Д.В., Шугарова В.В.// *Журнал фізичних досліджень*. – 2021. – V.25 – No. 3.– С. 3705 – 3708.

17. Шершньов І.І. Вплив халькогенідної обробки на вольт-амперні характеристики  $p-n$  переходів на основі  $GaAs$ . / Шершньов І.І., Маслєєва Н. В., Богдан О. В. // VI Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Фізичні основи сучасних технологій в будівельній індустрії» – Одеса, 5 квітня, 2024 р., – С. 46 - 50.