

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Кафедра електроніки і енергетики

**Електричні та фотоелектричні властивості
гетеропереходів p -CdTe/MoN/ITO**

Дипломна робота

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Виконала: студентка 4 курсу, групи 433
напряму підготовки 6.050701-Електротехніка
та електротехнології
Сарай В.І.
Керівник: асист. Ковалюк Т. Т.
Рецензент: Круліковський О.В.

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № ____

від „____” _____ 2019 р.

зав. кафедри _____ проф. Мар'янчук П.Д.

Анотація

В даній бакалаврській роботі було досліджено електричні та фотоелектричні властивості гетероструктури сформованої шляхом нанесення тонких плівок MoN/ITO на кристалічну підкладку CdTe *p*-типу провідності, методом реактивного магнетронного розпилення.

На основі досліджень вольт-амперних характеристик, було визначено наступні параметри: коефіцієнт випрямлення, висота потенціального бар'єру, послідовний та шунтуючий опір, коефіцієнт неідеальності, встановлено, що дана гетероструктура є фоточутлива і може бути використана в якості фотодіодів.

Робота написана українською мовою та містить 47 сторінок, 30 рисунків, 3 таблиці, 18 літературних посилань.

Зміст

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. Теоретична частина	6
1.1 Фізичні та кристалохімічні властивості CdTe.....	6
1.2 Основні фізичні властивості телуриду кадмію та його застосування.....	7
1.3 Типи точкових дефектів у телуриді кадмію.....	9
1.4 Застосування телуриду кадмію.....	10
1.5 Фізичні властивості нітриду молібдену (MoN).....	11
1.6 Фізичні властивості тонких плівок ITO.....	15
РОЗДІЛ 2. Експериментальна частина	24
2.1 Універсальна вакуумна установка Leybold-Heraeus L560.....	24
2.2 Технологія напилення тонких плівок MoN/ITO на підкладку p-CdTe методом реактивного магнетронного напилення.....	26
2.3 Вимірювання електричних властивостей гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO.....	31
2.4 Чотирьохзондовий метод вимірювання поверхневого опору.....	32
РОЗДІЛ 3. Обговорення результатів	35
3.1. Вольт-амперні характеристики гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO. Електричні властивості гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO.....	35
3.2. Механізми струмопереносу.....	36
3.3. Фотоелектричні властивості гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO.....	38
Висновки	40
Список використаної літератури	41
Додаток.....	43
Техніка безпеки і охорона навколишнього середовища.....	43

Вступ

В наш час питання отримання екологічно чистої, і що не менш важливо, економічно доступною енергії стоїть особливо гостро. Одним з перспективних рішень є використання енергії сонця для забезпечення потреб населення в електричній енергії. Головною складовою домашньої сонячної електростанції, поза всякими сумнівами, є фотоелектричні елементи або, як їх частіше називають, сонячні батареї. Вони виконують основну функцію - перетворення енергії сонця в електричний струм. Сонячні батареї включають до свого складу окремі з'єднані разом фотоелектричні елементи, що забезпечують необхідну продуктивність всієї установки. Сьогодні на ринку сонячного обладнання можна зустріти п'ять різних типів фотоелектричних елементів, які відрізняються матеріалом виготовлення і деякими технічними особливостями [1].

CdTe є досить поширеним матеріалом, що дає змогу виготовляти СЕ дешевше, наприклад, в порівнянні з кремнієм. Ширина забороненої зони CdTe становить 1,5 еВ - майже ідеальне значення для одноперехідного СЕ [2-4]. Будучи прямозонним напівпровідником [5], CdTe володіє досить високим коефіцієнтом поглинання [6] і тому можливе використання у вигляді тонких плівок, достатніх для інтенсивного поглинання світла. На відміну від багатьох інших напівпровідників сімейства II-VI, телурид кадмію може бути отриманий як n-, так і р-типу. На основі телуриду кадмію існують різні типи СЕ: з гомогенним переходом, бар'єром Шотткі [7].

Тонкі плівки CdTe можуть бути досить просто отримані в різний спосіб, що відкриває широкі можливості для оптимізації і здешевлення СЕ. Серед методів нанесення CdTe найбільш часто використовуються методи сублімації в замкнутому просторі, хімічного осадження, напилення, електроосадження, магнетронного напилення, трафаретного друку [6].

Фотоелектричні панелі, виконані на основі телуриду кадмію (CdTe) виготовляються з використанням плівкової технології. Напівпровідниковий шар наноситься дуже тонко, всього в кілька сотень мікрометрів. Ефективність батарей на основі телуриду кадмію невисока - всього одинадцять відсотків. Разом з тим, батареї даного типу виробляють енергію, кінцева вартість яких нижче на двадцять-тридцять відсотків, ніж у кремнієвих аналогів [7].

Метою даної бакалаврської роботи є дослідження електричних і фотоелектричних властивостей гетероструктури p -CdTe/MoN/ITO сформованої шляхом нанесення тонких плівок MoN/ITO на кристалічну підкладку CdTe p -типу провідності, методом реактивного магнетронного розпилення.

РОЗДІЛ 1. Теоретична частина

1.1 Фізичні та кристалохімічні властивості CdTe

Телурид кадмію (CdTe) — кристалічна речовина з кристалічною ґраткою типу цинкової обманки (ZnS). Напівпровідник відноситься до групи сполук типу $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. Застосування ґрунтується на напівпровідникових властивостях речовини. У монокристалічній формі телурид кадмію використовується для створення детекторів гамма й жорсткого рентгенівського випромінювання [2].

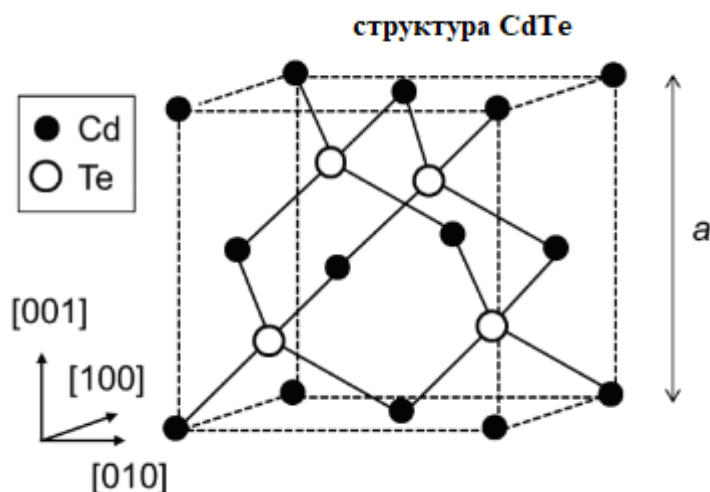


Рис. 1.1. Комірка кристалічної структури CdTe. Штрихові лінії визначають межі елементарних комірок, а суцільні лінії представляють зв'язки Cd-Te.

Розміщення атомів — тетраедричне. Кожен атом оточений чотирма атомами іншого елемента, розташованими у вершинах правильного тетраедра. Такі тетраедри формують характерну для CdTe структуру сфалериту, хоча тонкі плівки можуть бути також й структури в'юрциту [3].

Монокристали телуриду кадмію отримуються методом Бріджмена, рухомого нагрівника чи з парової фази. Існують проблеми з вирощуванням монокристалів телуриду кадмію великого об'єму й високої якості

водночас. Загалом це пов'язано із достатньо високою температурою плавлення матеріалу, а також з специфічною областю гомогенності.

Кадмій телурид за своїми фізичними характеристиками та параметрами володіє певними перевагами: велика ширина забороненої зони ($\Delta E = 1,5$ eV); здатність проявляти обидва типи провідності (n-, p-); низька концентрація власних носіїв заряду за звичайних умов ($2,0 \cdot 10^6$ см⁻¹ при 300K); низький коефіцієнт поглинання світла в ІЧ-області спектру; висока стійкість до хімічних реагентів та вологості; порівняно висока рухливість носіїв заряду; не дуже жорсткі умови синтезу.

Таблиця 1.1 – Фізичні властивості CdTe

Коефіцієнт теплового розширення	$5,9 \times 10^{-6}$ / К при 293 К
Модуль Юнга	52 ГПа
Коефіцієнт Пуассона	0,41

1.2 Основні фізичні властивості телуриду кадмію та його застосування

Завдяки унікальному набору фізичних властивостей телурид кадмію є перспективним матеріалом для виготовлення на його основі цілого ряду високоефективних пристроїв ядерної енергетики, геліотехніки, опти- та акустoeлектроніки [4].

CdTe - широкозонний напівпровідник, який має високий коефіцієнт пропускання (~70%) електромагнітного випромінювання в інтервалі довжин хвиль $\lambda = 2,0 - 30$ мкм. Ці властивості дозволяють використовувати його для виготовлення фільтрів для цієї частини спектру та електронно-оптичних модуляторів у близькій та далекій інфрачервоній області. Велику увагу привертають люмінесцентні властивості CdTe. Прямі переходи валентна зона - зона провідності та переходи через мілкі акцепторні рівні викликають випромінювання в інфрачервоній області спектру.

Телурид кадмію вважається одним з найперспективніших матеріалів для виготовлення н/п детекторів рентгенівського та у-випромінювання, які працюють при кімнатних температурах. Як правило для детектування

низькоенергетичного рентгенівського випромінювання, використовується низькоомний n -CdTe, а для реєстрації високо енергетичного випромінювання потрібно використовувати напівізолючий матеріал з питомим опором $\rho = (10^{-10}) \text{ Ом/м}$ [4].

Телурид кадмію також є одним з найбільш перспективних матеріалів для створення тонкоплівкових сонячних елементів. Він має оптимальну для ефективного перетворення сонячної енергії ширину ЗЗ, високий коефіцієнт поглинання світла у видимій області спектру, велику рухливість електронів ідірок; може бути отриманий як n , так і p -типу провідності. Остання обставина дозволяє виготовляти сонячні елементи з гомопереходами, гетеропереходами, а також на основі структур метал - напівпровідник і метал-діелектрик-напівпровідник, що відкриває широкі можливості для вибору їх оптимальних конструкцій.

Таке широке використання CdTe обумовлене його екстремальними фізичними властивостями (табл.1.1). Зокрема CdTe є найважчим з напівпровідників групи A^2B^6 ($M=240-10 \text{ кг/моль}$). Його іонність за Філіпсом ($I_{ph}=0,717$) також є найбільшою серед з'єднань даної групи.

Телурид кадмію може кристалізуватися у двох основних кристалічних структурах: кубічній типу цинкової обманки (сфалерит), яка є стабільною, та метастабільній гексагональній (в'юртцит). Ці модифікації відрізняються одна від одної тільки порядком чередування щільно упакованих шарів атомів. Значення сталої ґратки сфалеритної фази CdTe є найбільшим серед усіх сполук даної групи з аналогічною кристалічною структурою.

Електрофізичні властивості матеріалу визначаються параметрами та конфігурацією його ЗЗ, ширина якої є найменшою серед сполук A^2B^6 .

Телурид кадмію має високі значення тисків пари поблизу точки плавлення, що ускладнює виготовлення зразків з розплаву, але створює сприятливі умови для вирощування кристалів та тонких плівок з парової фази. При випаровуванні CdTe дисоціює, його газова фаза являє собою суміш пари

компонентів сполуки, молекули халькогеніду там майже відсутні [5]. Пара кадмію у суміші є моноатомною, одночасно телур може перебувати як в одноатомному так і у двоатомному стані, при цьому перший стан переважає.

Можливість керування електричними властивостями матеріалу визначається його областю гомогенності. Область гомогенності CdTe досить асиметрична. Для температур менших за 1000 К більша частина області існування сполуки лежить з боку кадмію, а при T нижчих ніж 1000 К вона зміщується у бік телуру. Необхідно зазначити, що межі області гомогенності визначені різними авторами, досить сильно відрізняються одна від одної, що можна пояснити використанням різних методик вимірювання.

1.3 Типи точкових дефектів у телуриді кадмію

Реальні напівпровідники відрізняються від ідеальних наявністю структурних недосконалостей, зокрема точкових дефектів (ТД). Саме ці дефекти, які у більшості випадків є зарядженими, визначають структурно-чутливі характеристики нелегованого матеріалу. CdTe це бінарна сполука кристалічна гратка якої складається з підграток Cd та Te. У цьому випадку можливе утворення наступних нейтральних ТД: вакансій за підгратками кадмію V_{Cd} та V_{Te} , міжвузлових атомів металу та халькогену Cd° (Te°), антиструктурних розупорядкувань Cd°_{Te} та Te°_{Cd} . Концентрація того чи іншого дефекту у матеріалі визначається термодинамічними параметрами його утворення, за кількістю домінують дефекти ентальпія утворення яких є мінімальною [6].

Кожний заряджений ТД створює у ЗЗ матеріалу локалізованих станів з енергією залягання, який може знаходитися як поблизу зони провідності (валентної зони) і тоді дефект є донором (акцептором), так і у її глибині. В останньому випадку дефект є пасткою чи рекомбінаційним центром для носіїв заряду. Власні ТД у CdTe можуть утворювати різноманітні комплекси як між

собою, так і з неконтрольованими домішками, які завжди присутні в напівпровідниковому матеріалі.

Необхідність цілеспрямованого керування електрофізичними властивостями кристалів та плівок CdTe обумовила значний інтерес до вивчення дефектної структури матеріалу залежно від технологічних умов його одержання і наступної термообробки [7]. Однак необхідно констатувати, що у наш час механізми дефектоутворення та спектр енергетичних рівнів ТД у 33 CdTe вивчені не достатньо, а ідентифікація більшості з них є спірною.

1.4 Застосування телуриду кадмію

Оптимальна ширина забороненої зони телуриду кадмію 1.45 eV, високе оптичне поглинання, низька вартість і досить проста і низьковитратна технологія синтезу роблять СЕ на CdTe перспективними. Серед недоліків CdTe як матеріалу для СЕ необхідно відзначити складність отримання р-типу CdTe, труднощі створення низькоомних контактів до р-типу CdTe, рекомбінаційні втрати в р-п-переході, високу токсичність кадмію і малі запаси телуру. У недавніх роботах пропонується використовувати буферний шар MoO_x для оптимізації властивостей омичного тильного контакту до р-CdTe, що має високу роботу виходу. СЕ з CdTe належать до найбільш дешевим типам сонячних елементів, хоча порівняння загальної встановленої вартості залежить від розміру установки і багатьох інших факторів, і з року в рік він швидко змінювався. На ринку сонячних батарей CdTe домінує First Solar. У 2011 році було вироблено близько 2 ГВт сонячних батарей CdTe [1-7].

CdTe можна легувати ртуттю, щоб виготовити універсальний інфрачервоний детекторний матеріал (HgCdTe). CdTe, легований невеликою кількістю цинку, створює чудовий твердотільний рентгенівський і гамма-детектор (CdZnTe).

CdTe використовується в якості інфрачервоного оптичного матеріалу для оптичних вікон і лінз і, як доведено, забезпечує хорошу продуктивність в

широкому діапазоні температур. Рання форма CdTe для використання IR була продана під торговим найменуванням Irtran-6, але це застаріло.

CdTe також застосовується для електрооптичних модуляторів. Він володіє найбільшим коефіцієнтом лінійного електрооптичного ефекту серед кристалів сполуки II-VI ($r_{41} = r_{52} = r_{63} = 6,8 \times 10^{-12} \text{ м / V}$).

CdTe, легований хлором, використовується як детектор випромінювання для рентгенівських променів, гамма-променів, бета-частинок і альфа-частинок. CdTe може працювати при кімнатній температурі, що дозволяє створювати компактні детектори для широкого спектра застосувань в ядерній спектроскопії. Властивості, які роблять CdTe чудовим для реалізації високоефективних гамма і рентгенівських детекторів, являють собою велику атомне число, велику заборонену зону і високу рухливість електронів $\sim 1100 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, що призводить до високого власним $\mu\tau$ (час життя рухливості) і, отже, високий ступінь збору заряду і відмінне спектральний дозвіл. Через погані властивості переносу заряду дірок, $\sim 100 \text{ см}^2/\text{Вс}$, геометрія детектора з однієї несучої використовується для отримання спектроскопії високого дозволу; вони включають в себе копланарні сітки, детектори frish-collar і маленькі детектори пікселів [7].

1.5. Фізичні властивості нітриду молібдену (MoN)

Нітрид молібдену - неорганічна сполука металу молібдену і азоту з формулою MoN, утворює кристали кубічної сингонії, параметри комірки $a = 0,4163 \text{ нм}$ [8].

Нітриди перехідних металів демонструють високу твердість, високі температури плавлення і хороші хімічної та фізичної стійкості і використовувалися, як поверхневі покриття, каталізатори. Нітриди перехідних металів d-блоку є закритими сполуками. Азот, що має значно менший атомний розмір порівняно з перехідними металами, займає октаедричні інтерстиціальні ділянки між атомами металу перехідного металу. Більшість двійкових нітрідів

перехідних металів існують у кубічній структурі NaCl і гексагональної структури WC.

Кристалічна структура нітриду молібдену показана на (рис.1.3) фазова діаграма системи молібдену - азот (Mo –N) [9].

Система Mo – N існує на наступних етапах:

(i) α фаза - У цій фазі молібден (Mo) має дуже мало азоту від 0 до 1,08 ат. %. Молібден існує в центрі кубічної решітчастої системи в α -фазі. Азот, атомна концентрація в α -Mo дуже низька нижче 1000 °C і досягає максимуму концентрація 1,08 ат. %, при температурі евтектики 1860°C, де солідус і лінії ліквідації перетинаються.

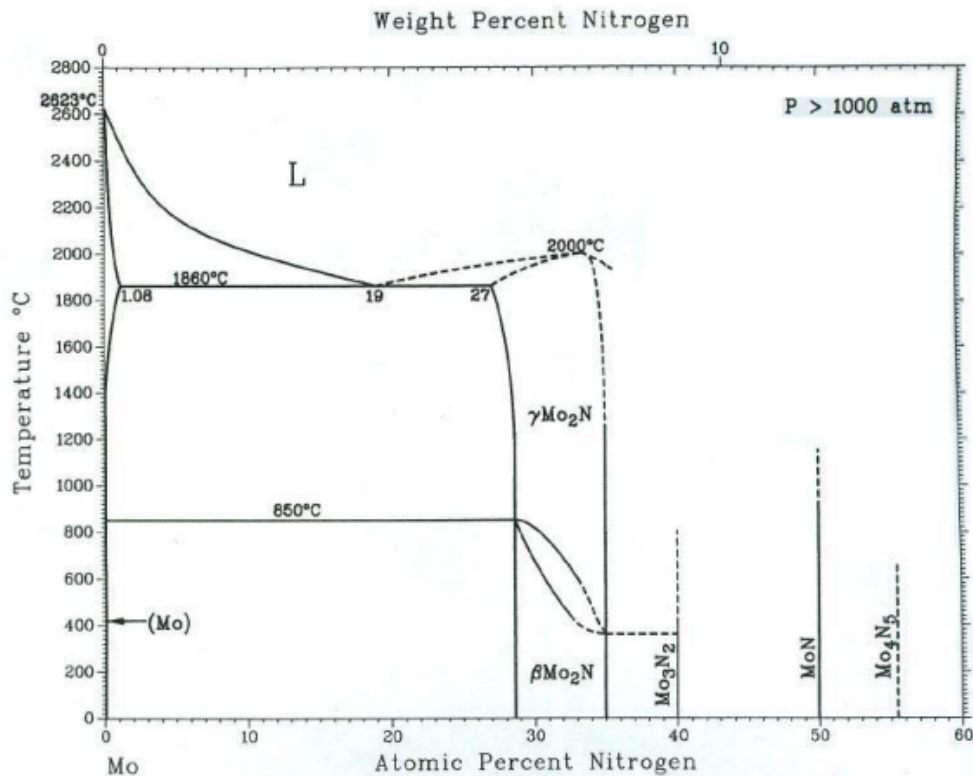


Рис. 1.3 - Фазова діаграма молібдену – азоту.

(ii) β -фаза - молібден і азот кристалізуються при низьких температурах з утворенням β -Mo₂N. Кристали β -Mo₂N мають тетрагональну точку у центрі з упорядкованим масивом атомів азоту та концентрації від 28,7 до 35 ат.%. Константи решітки для елементарної комірки β -Mo₂N є $a = b \neq c$. β -Mo₂N має

структуру $I41/amd$, як показано на рис.рис. 1.4, і вважається, що тетрагональна модифікація кубічної фази $\gamma\text{-Mo}_2\text{N}$ є постійною решітки [10].

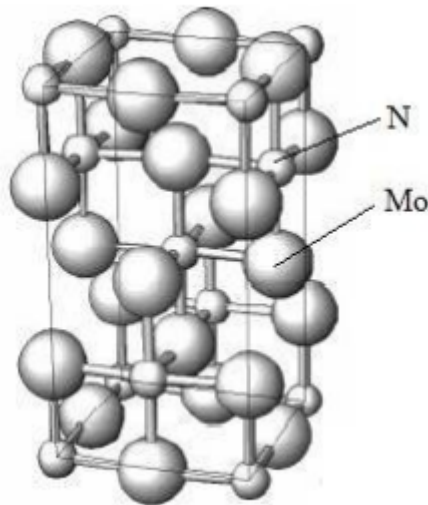


Рис. 1.4 - Кристалічна структура $\beta\text{-Mo}_2\text{N}$.

(iii) γ -фаза - $\gamma\text{-Mo}_2\text{N}$ містить азотні атомні концентрації 27 - 35 ат. % і формуються при високих температурах у вигляді гранецентрованої кубічної решітки з дефектною структурою B1 (Рис. 1.5), причому половина положень азотної підґратки вакантна. Там також існує фаза B1-MoN, яка утворюється за рахунок збільшення концентрації азоту і заповнення вакантних ділянок в підґратці атома азоту в дефектному B1 $\gamma\text{-Mo}_2\text{N}$ структура. Але B1-MoN не показаний на фазовій діаграмі, оскільки він є термодинамічно нестійка і термодинамічно стабільна гексагональна [10].



Рис. 1.5 - Кристалічна структура $\gamma\text{ Mo}_2\text{N}$.

δ фаза - δ -MoN формується при 50 ат. % азоту і має гексагональну структуру, та належить до просторової групи $P63mmc$ (Мал.1.6.). Деякі слабкі додаткові лінії в рентгенівській дифракційній картині вказує на наявність надгратки.

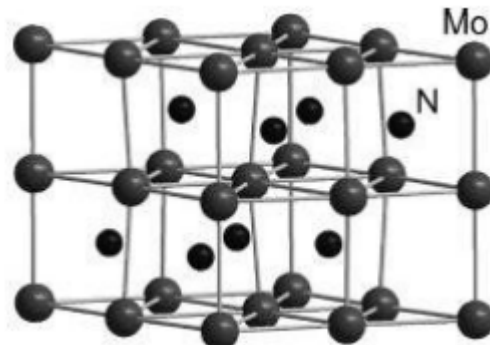


Рис. 1.6 - Кристалічна структура δ -MoN.

Структурні та механічні властивості нітриду молібдену

Розпилення мішеней молібдену в присутності газів Ar і N_2 призводить до утворення γ -Mo₂N при більш низьких концентраціях азоту, і гексагональному δ -MoN при більш високому концентрації азоту. Властивості плівок Mo-N і їх варіації буде пояснено властивості з фазою Mo-N [11].

Твердість плівок нітриду молібдену MoN у змінюється з азотом. Твердість плівок нітриду молібдену зменшується зі збільшенням 'у' в присутності fcc γ -Mo₂N. Ця тенденція в твердості пов'язана з міцністю Mo-N зв'язку. Спочатку для низьких концентрацій азоту, електрони в нижніх зв'язних смугах, що відповідають 4d підрівню в Mo (конфігурація електронів [Kr] 5s¹4d⁵) і підрівень 2p в N (з електронною конфігурацією 1s², 2s², 2p³) сильно гібридизують з утворенням Mo-N ковалентного зв'язку, що призводить до високої твердості. Із збільшенням концентрації азоту всі низинні зв'язувальні смуги зайняті електрони і додаткові електрони займають більш лежачі зони. Це викликає порушення ковалентного зв'язку, утворюючи більш слабку іонний зв'язок, а

отже твердість зменшується. З появою гексагональної δ -MoN твердість зростає через більш високу когезійну енергію [11].

Фаза δ -MoN має більший об'ємний модуль порівняно з γ -Mo₂N. Модуль величини об'єму 345 ГПа для δ -MoN, і 301 ГПа для γ -Mo₂N. Більш високий модуль навантаження у випадку δ -MoN в свою чергу обумовлений більш високим когезивною енергією для δ -MoN. Більш висока твердість зазвичай спостерігається у плівок з високим напруженням стиснення де в якості більш м'яких матеріалів проявляють розтягуючу напругу. Визначено залишкові напруження в плівках Mo-N і виявили, що γ -MoN плівки проявляють напруження розтягування $1,6 \pm 0,4$ ГПа, плівки B1 MoN_{0,8} мають напругу розтягування $2,05 \pm 0,1$ ГПа та δ -MoN плівки показують напруження стиснення $-3,3 \pm 0,2$ ГПа. Плівки δ -MoN щільно упаковані і високо впорядковані, стабільні порівняно з іншими фазами Mo-N [11].

1.6. Фізичні властивості тонких плівок ІТО.

Оксид індію-олова (або індієвий-олов'яний окис, indium-tin oxide - ІТО) є сумішшю оксиду індію (III) (In₂O₃) і оксиду олова (IV) (SnO₂), як правило, в співвідношенні 90% In₂O₃, + 10% SnO₂ по масі. Є напівпровідником *n*-типу провідності, порівнянно з металевою, де іони олова служать донорами електронів. В тонких шарах близько 200 nm, нанесений на скло при близько 400 °C демонструє високу прозорість і має поверхневий опір близько 6 Ом / квадрат. ІТО є одним з найбільш широко використовуваних прозорих в широкому спектральному діапазоні матеріалів, що володіє високою електричною провідністю і оптичною прозорістю, який також може бути легко осаджений у вигляді тонкоплівкового покриття. Відомо, що для всіх прозорих плівок повинен бути знайдений компроміс між провідністю і прозорістю, оскільки збільшення товщини і концентрації носіїв заряду призводить не тільки до зменшення прозорості, а й до збільшення провідності матеріалу [12].

ІТО покриття часто використовуються для виготовлення прозорих покриттів для рідкокристалічних, плоских і плазмових дисплеїв, сенсорних панелей, електронного чорнила. Тонкі ІТО плівки також використовуються в органічних світлодіодах, сонячних батареях, електромагнітному екрануванні і антистатичних покриттях, в органічних світлодіодах (анод, інжекційні дірковий шар). ІТО покриття призначені для різних оптичних покриттів, особливо в якості інфрачервоних відображаючих покриттів для автомобільних і натрієвих ламп. Інші області застосування включають в себе газові детектори, що просвітлюють покриття, а також використання в процесі електрозмочування діелектриків [13].

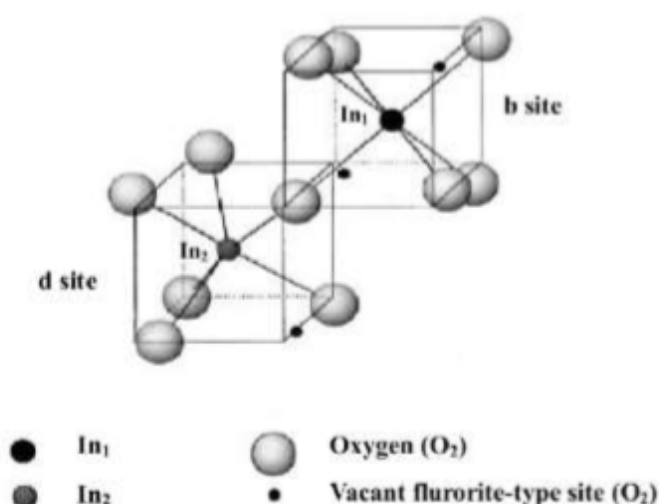


Рис. 1.10 Зображення кристалографічного осередку оксиду індію



Рис. 1.11 Структура ІТО (хімічні формули - молекулярна та емпірична)

Молекулярний вага: 264.94

Молекулярна формула - $(\text{In}_2\text{O}_3)_{0,9} (\text{SnO}_2)_{0,2}$

Фізичний стан: твердий

Колір: безбарвний

Температура плавлення: 1800-2200 К (1526-1926 °С)

Густина: 7120-7160 кг / м³ при 293 К

Індекс відображення : n_{20} / D 1.5290-1.5460 (lit.)

Таблиця 1.2 - Загальні властивості ІТО

Оксид індій-олова	
Загальні	
Традиційна назва	змішаний оксид індію-олова
Хім. формула	$(\text{In}_2\text{O}_3)_{0,9} - (\text{SnO}_2)_{0,1}$
Фізичні властивості	
Стан	Безбарвна тверда речовина
Молярна маса	264,94 г/моль
Щільність	7,12 г/см ³ (25 °С) [1]
Хімічні властивості	
Розчинність у воді	Не розчиняється

Електричні властивості плівок ІТО

Оксид індію до впровадження олова є виродженим напівпровідником *n*-типу з широкою шириною забороненої зони. Відхилення в стехіометрії відбивається на електропровідності ІТО. У зону провідності електрони потрапляють з донорних рівнів, пов'язаних з вакансіями, що забезпечуються киснем або зайвими іонами металу. На рис. 1.12 представлена зонна діаграма оксиду індію [14].

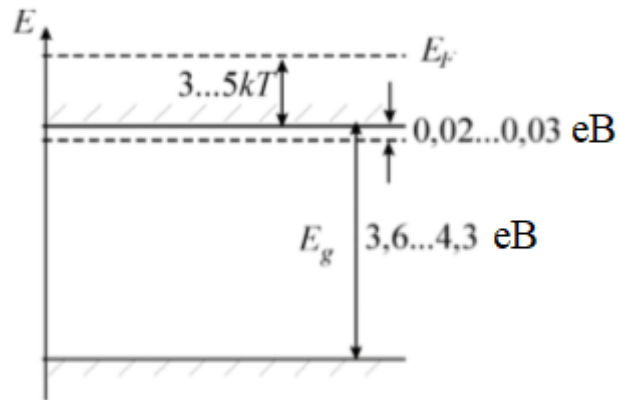


Рис. 1.12 - Зонна діаграма оксиду індію

Низька енергія утворення звичайних ІТО призводить до великого дефіциту O_2 навіть в умовах рівноважного зростання. Таким чином, формула оксиду індію може бути записана як $In_2O_3 \cdot x(V)_x$, де V - двічі заряджена вакансія кисню донорного типу, що відправляє в зону провідності два вільних електрона. Значення параметра x зазвичай менше 0,01. Концентрація вільних носіїв заряду знаходиться в межах $10^{10} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Для того, щоб збільшити концентрацію електронів провідності ІТО плівок потрібно провести легування чотирьохвалентним оловом, який буде заміщати іони In^{3+} , або робити утворення кисневих вакансій при вирощуванні плівок, провівши відпал при високій температурі після осадження, що призводить до матеріалу $In_{2-y}Sn_yO_{3-2y-x}(V)_x$. В такому випадку відбувається підвищення концентрації до 10^{21} см^{-3} , а їх рухливість становить від 10 до 30 $\text{см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$ [15].

При легуванні ІТО є такий рівень впровадження домішки, який призводить до найменшого опору. У матеріалі, легуваному низьким рівнем, розсіювання електронів на домішкових атомах, фононах, на дефектах, вакансії кисню і кордонах зерен помітно знижує їх рухливість, що призводить до підвищення опору плівок ІТО. Що стосується сильно вироджених плівок, напилених або відпалених при високих температурах ($\geq 200^\circ \text{C}$), переважним розсіюванням є розсіювання іонізованої домішки.

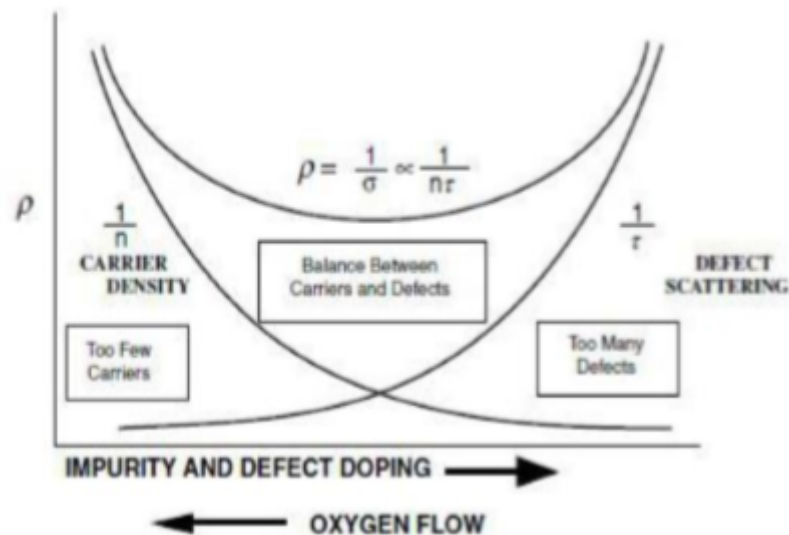


Рис. 1.13 - Якісна модель легування прозорих оксидів

Питомий опір, рухливості і щільності носіїв заряду плівок, осаджених при оптимальному значенні $O_2 / (O_2 + Ar)$ і відпалених в трьох різних режимах атмосфери показані на рис. 1.15 а – с, як функція концентрації SnO_2 в мішені. Значення для осаджених плівок також показані для порівняння. Питомий опір осаджених плівок поступово зростає зі збільшенням SnO_2 . Через зменшення як рухливості, так і щільності носіїв заряду [16].

Мінімальний питомий опір для чистих плівок In_2O_3 (SnO_2 : 0%) з найбільшою рухливістю і щільністю носіїв, що можна пояснити тим, що Sn^{4+} не генерують ніяких носіїв, але діють як нейтральні центри розсіювання зі збільшенням концентрації SnO_2 в аморфних плівках. На рис. 1.14 представлена спрощена структура плівок оксиду індію.

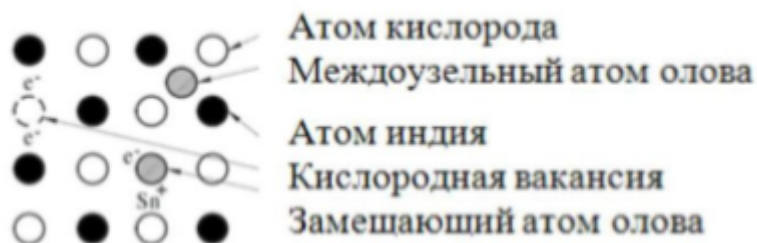


Рис. 1.14 - Спрощена структура плівок $In_2O_3 \cdot x(V x)$.

Після відпалу при всіх трьох атмосферах питомий опір зменшується зі збільшенням SnO_2 від 0 до 5% SnO_2 . Опір майже постійний (близько $2,1 \cdot 10^{-4}$ Ом $\cdot$ см) між 5 і 15% SnO_2 і потім збільшується в діапазоні від 44,5 і до 100% SnO_2 . Ці зміни питомого опору (рис. 1.15) обернено пропорційні щільності носіїв заряду, тобто щільність носіїв значно зростає зі збільшенням концентрації SnO_2 і досягає максимального значення ($1,4 \cdot 10^{21}$ / cm^3) при 10% SnO_2 . З іншого боку, концентрація носіїв помітно зменшується зі збільшенням концентрації SnO_2 до 20%. Збільшення щільності носіїв має бути викликано збільшенням електрично активованих заміщаючих іонів Sn^{4+} на місцях In^{3+} , які забезпечують вільні електрони і збільшуються пропорційно концентрації SnO_2 під час кристалізації. З іншого боку, рухливість відпалених плівок помітно зменшилася з 82, 93 і 101 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ при 0% SnO_2 до приблизно 20 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ при 5% SnO_2 і лишалася незмінною між 5 і 20% SnO_2 [17].

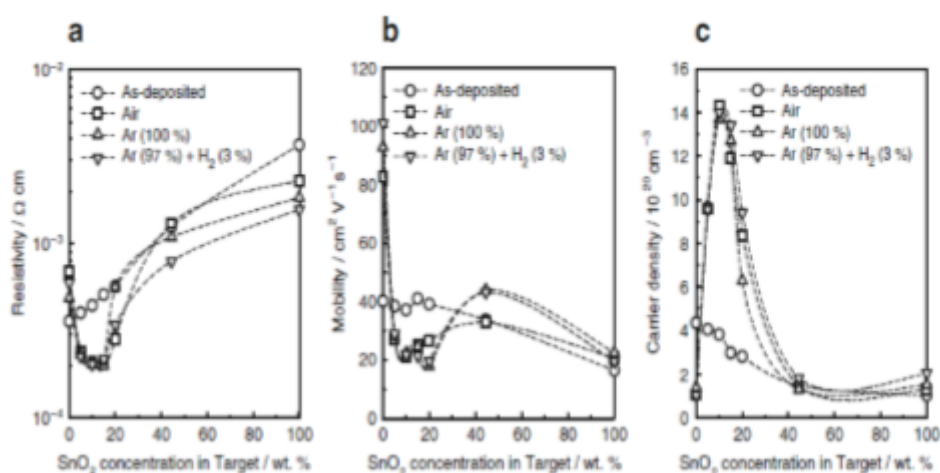


Рис. 1.15 - а) Питомий опір, б) рухливість, с) щільність носіїв заряду в плівках, відпалених в трьох різних атмосферах в залежності від концентрації SnO_2 мішені. Квадратиками позначено 200 ° С, 1 година відпалу повітря; Трикутники 200 ° С, 1 година відпалу в Ar (100%); Маркери зворотних трикутників показують 200 ° С, 1 година в Ar (97%) + H_2 (3%). Значення для осаджених плівок також показані для порівняння.

Це можна пояснити тим, що утворюються комплекси на основі Sn-оксидів, які виступають в якості нейтральних центрів розсіювання для плівок з більш високим вмістом SnO_2 .

Оптичні властивості тонких плівок ІТО

Унаслідок взаємодії компонентів електричного поля світла з електронами легованого матеріалу, відповідно до теорії Друде, для моделі вільних електронів в прозорих оксидах існує взаємозв'язок між оптичними та електричними властивостями матеріалу. Типові для ППО спектри пропускання, відбиття і поглинання представлені на рис. 1.16.

ІТО мають високий коефіцієнт пропускання у видимій області спектра діапазону 400 - 750 нм ($h\nu = 3.1 - 1.7\text{eV}$). Світлова хвиля з меншою довжиною (<350 нм або 3.5 eV) має енергію, що перевищує ширину оптичної щілини (від 3 eV до $4,5$ для різних матеріалів цього класу), тому поглинається при переходах. В результаті чого в цьому діапазоні довжин хвиль відбувається різке зменшення пропускання і збільшення відображення світлового випромінювання.

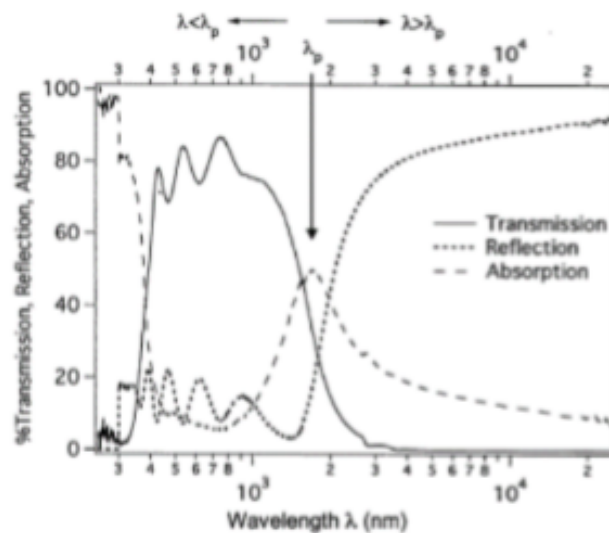


Рис. 1.16 - Типові спектри пропускання, відбиття і поглинання плівки прозорого оксиду

Друге зменшення пропускання і збільшення відображення світлового випромінювання донними матеріалами спостерігається з іншого боку спектра в

області довжин хвиль понад 1500 нм. Цей перехід, відповідає максимуму поглинання, пов'язаний з так званої плазмової довжиною хвилі (λ_p на рис. 1.16), коли частота світла збігається з частотою колективних осциляцій електронів в матеріалі [17].

Електронні осциляції в фазі з компонентною електричного поля світла призводять до його поглинання. При $\lambda < \lambda_p$ хвильова функція є осцилятором і випромінювання може передаватися, приводячи до прозорості матеріалу. Коли $\lambda > \lambda_p$ випромінювання не може передаватися, призводить до відображення. На оптичні властивості прозорих проводять оксидів різний вплив надають концентрація електронів n і їх рухливість μ . Значення концентрації електронів провідності впливає на коефіцієнт пропускання і в короткохвильової, і в довгохвильовій областях. Зазвичай, обидві ці межі зсуваються в короткохвильову область зі збільшенням значення n . При цьому, зміна краю пропускання електромагнітної хвилі світла в області менше 350 нм (енергія фотонів перевищує ширину оптичної забороненої зони) пропорційно $n^{2/3}$ (ефект Бурштейна-Мосса), в той час як край пропускання плазмової довжини хвилі пропорційний $n^{1/2}$. Рухливість μ локально не впливає на короткохвильову межу пропускання або плазмову довжину хвилі. Таким чином, досягнення оптимальних значень високої провідності і широкої смуги пропускання можливо при високому значенні μ і низьким значенні n [18].

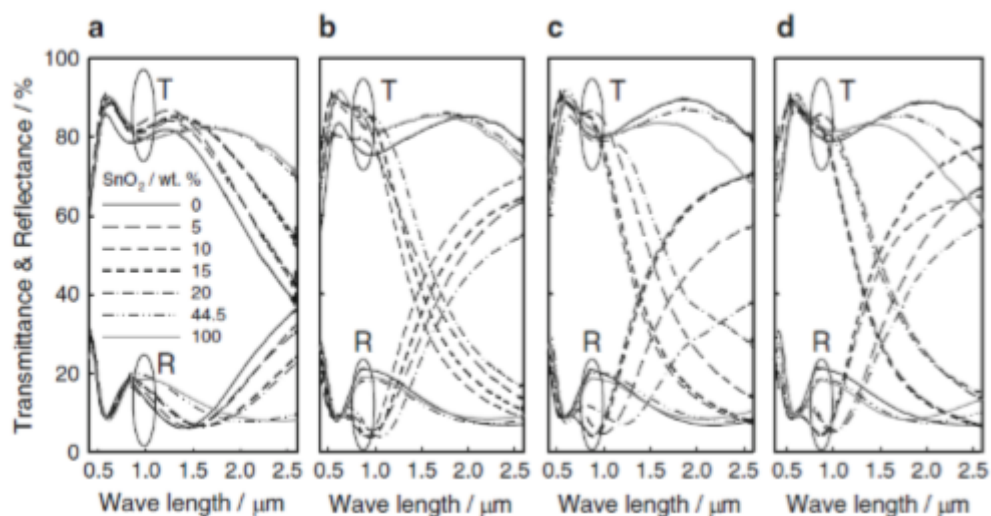


Рис. 1.17 - Спектр пропускання і відбиття (а) осаджених і відпалених плівок (b) в повітрі, (c) в Ar (100%) і (d) в Ar (97%) + H₂ (3%) протягом 1 години при 200 ° С.

Таблиця 1.3 - Вимоги до ППО, використовуваним в ТП СЕ

Конфігурація СЕ	Зовнішній ППО	Внутрішній ППО
<i>p- і n- тип</i>	Низький поверхневий опір	Низький поверхневий опір
	опір (<16 Ом); - високе оптичне пропускання (> 80%) в діапазоні 350-1100 нм; - велика поверхнева шорсткість (70-100 нм).	опір (<16 Ом); високе оптичне пропускання (> 80%) в діапазоні 650-1100 нм для одноперехідного СЕ, і в діапазоні 650-1100 нм для тандемного мікроморфного СЕ.
<i>n- і p- тип</i>	- низький поверхневий опір (<16 Ом); - високе оптичне пропускання (> 80%) в діапазоні 350-1100 нм; - поверхнева наношорсткість: не має обмежень (шорсткість частково задається полікристалічним шаром кремнію).	- низький поверхневий опір (<16 Ом); - високе оптичне пропускання (> 80%) в діапазоні 650-1100 нм для одноперехідного СЕ, и в діапазоні 650-1100 нм для тандемного мікроморфного СЕ; - поверхнева шорсткість НЕ обмежена (задається текстурою тильного відбивача або підкладки).

Оптичні властивості обложених (а) і відпалених (б) в повітрі, (c) в Ar (100%) і (d) в Ar (97%) + H₂ (3%) протягом 1 години при 200 ° С показані на рис. 1.17 a-d. Всі плівки демонструють високий коефіцієнт пропускання понад 80% в діапазоні видимого спектру. З іншого боку, пропускання відпалених

плівок зменшується зі збільшенням концентрації Sn^{4+} , де коефіцієнт відбиття збільшується, в області 1 мкм.

РОЗДІЛ 2. Експериментальна частина

2.1. Універсальна вакуумна установка Leybold-Heraeus L560

На Рис. 2.1 зображена універсальна вакуумна установка Leybold-Heraeus L560 на якій проводилось напилення тонких плівок MoN/ITO.



Рис. 2.1 Універсальна вакуумна установка Leybold-Heraeus L560

Виготовлена з нержавіючої сталі вакуумна камера товщиною 10 мм, відкачується до високого вакууму завдяки турбомолекулярному насосу (30000 об/хв) з подвійним форвакуумним в парі. Тиск залишкових газів контролюємо за допомогою іонізаційної та термопарної ламп. Повний час відкачування камери до вакууму $5 \cdot 10^{-5}$ мбар ($5 \cdot 10^{-3}$ Па) становить 20 хвилин.

Вище згадана вакуумна установка передбачає можливість проводити технологічні режими наплення тонких плівок декількома методами, а саме: електронно-променеве випаровування, термічне випаровування, магнетронне розпилення при постійній напрузі.

В установці задіяна двоконтурна система охолодження, внутрішній контур містить в собі циркуляційний насос, акумулючий бачок з автоматичним контролем тиску дистильованої води та теплообмінний бачок, в якому протічна вода яка відбирає тепло із зовнішнього контуру. Автоматика контролює тиск води в середині системи. Рівня тиску 1,5 ат., достатньо для ефективного відбору тепла, яке виділяється при технологічних режимах.

У вакуумній камері вбудовані два резистивні випаровувачі, магнетрон на постійній напрузі та електронно – променевий модуль. Це сприяє експериментам з різноманітними технологічними методами нанесення тонких плівок.

У верхній частині вакуумної камери розміщується столик для кріплення підкладок. За допомогою двох електронагрівачів розміщених над столиком відбувається підігрів підкладок. Система термопар, що міститься всередині камери та контролер, який знаходиться на панелі управління забезпечують стабільну та точну задану температуру. Для забезпечення однорідності тонких плівок є передбачене обертання столика з контрольованою швидкістю.

Вакуумна установка Leybold-Heraeus L560 оснащена автоконтролером товщини плівок INFICON XTC. Передня панель цього приладу зображена на рис. 2.2.

Принцип роботи контролера опирається на зміну резонансної частоти власних коливань кварцової пластини з золотими контактами протягом процесу осадження розпиленого матеріалу. Автоматикою визначається резонансна частота коливань кварцової пластини раз на секунду, отримана інформація обробляється програмно, а товщину та швидкість нанесення плівки можемо спостерігати на рідкокристалічному екрані. Однак ця інформація стосується плівки яка нанесена на поверхню пластини датчика. Її положення відносно випаровувача відрізняється від положення столика на якому знаходяться підготовлені підкладки. Тому для отримання правдивих результатів вимірювання потрібно експериментально визначити поправочний коефіцієнт розміщення кварцового резонатора відносно підкладок майбутніх плівок. Це було реалізовано з допомогою визначення співвідношення фактичної до заданої товщин експериментальних плівок. При стаціонарному закріпленні підкладок над випаровувачем поправочний коефіцієнт становить 16,2, а коли столик обертається з підкладками – 6,3.

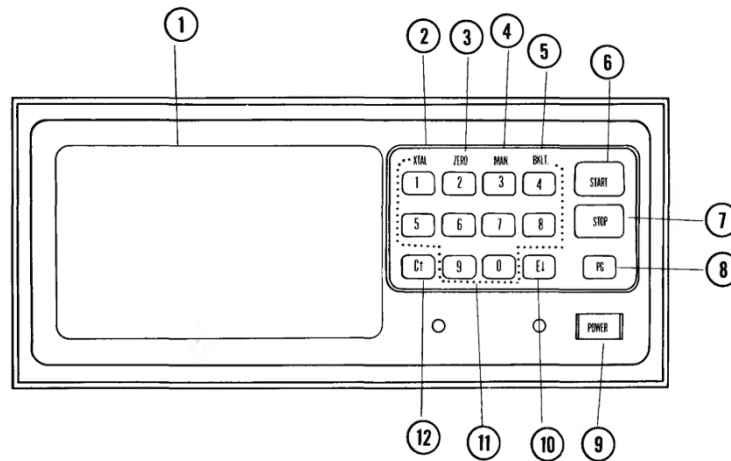


Рис. 2.2 Передня панель контролера товщини INFICON XTC:

1. *SCREEN* – Екран; 2. *XTAL* – Кристал. Забезпечує блискавичне відображення зносу кристалу; 3. *ZERO* – Збій акумульованої товщини; 4. *MAN* – Ручний режим. Забезпечує ручний режим контролю живлення; 5. *BKLT* – Підсвітка. Вмикає або вимикає підсвітку екрану; 6. *START* – Активує роботу вибраної програми; 7. *STOP* – Зупинка системи; 8. *PG* – Програма. Вибирає режим програми; 9. *POWER* – Управляє живленням; 10. *E↓* - Курсор вниз або ентер. Перемикає дві функції; 11. *Numeric Key Pad* – Калькулятор. Число вводиться на екрані біля положення курсора; 12. *C↑* - Очистка і курсор вгору. Перемикає дві функції.

2.2. Технологія напilenня тонких плівок MoN/ITO на підкладку p-CdTe методом реактивного магнетронного напilenня.

Напilenня досліджуваних тонких плівок MoN/ITO відбувалося методом реактивного магнетронного розпилення.

Метод магнетронного реактивного розпилення (MRS) - дуже складний технологічний процес, поєднує в собі розпилення в плазмі металевої мішені і проведення хімічної реакції між розпиленим матеріалом і реактивним газом, в тому числі на підкладці. Він дозволяє в широкому діапазоні управляти електрофізичними властивостями напильованої плівки.

Під магнетронним (катодним) розпиленням розуміють вилучення атомів з катода бомбардуючи його позитивно зарядженими іонами плазми (рис. 2.3).

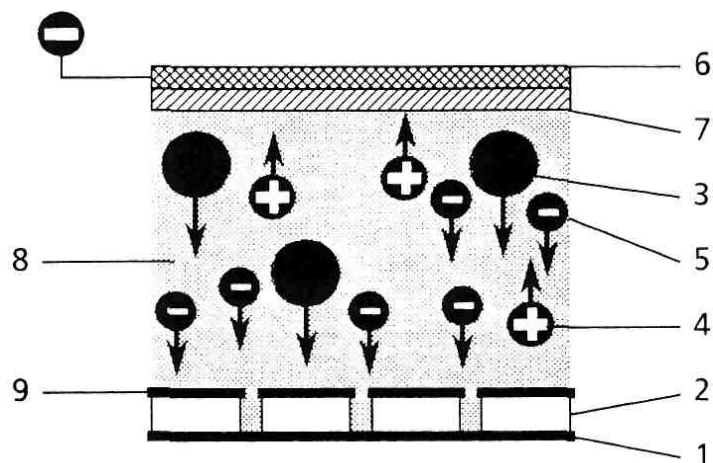


Рис. 2.3 Схематичне зображення процесу катодного розпилення: **1** – утримувач підкладки, **2** – підкладки, **3** – розпилені частки, **4** – іони плазми, **5** – вторинні електрони, **6** – катод, **7** – мішень, **8** – плазма, **9** – осаджений матеріал.

Плазма – це іонізований газ у електричному полі. В процесі катодного розпилення, плазма володіє характерним свіченням. Інтенсивність та колір цього свічення змінюватимуться в залежності від типу газу, його тиску та напруги що прикладена.

Позитивно заряджені іони прямують до катода і бомбардують його, як зображено на Рис. 2.3. Це призводить до вибивання атомів катоду. Після цього процесу, атоми що були вибиті, хаотично розлітаються у різних напрямках. Результатом цього процесу є осадження плівки матеріалу катоду на всій поверхні вакуумної камери.

Газ іонізується (або утворюється плазма) у вакуумній камері в наслідок того, що електрони, прискорені електричним полем рухаються від негативно зарядженого катода до позитивно зарядженої стінки в середині цієї камери. Під час свого руху ці електрони іонізують нейтральні атоми газу, яким заповнена вакуумна камера. З своєї сторони, позитивно заряджені іони, прискорюватимуться електричним полем до негативно зарядженого катода.

Щоб катодне розпилення відбувалось потрібно дотримуватись певних умов:

I. Перед початком катодного розпилення потрібно відкачати вакуумну камеру, щоб тиск залишкових газів становив менше 10^{-5} мбар.

II. Інертний газ, що використовується для забезпечення потрібного тиску у вакуумній камері.

III. Катод з мішенню на основі матеріалу для розпилення, які є електрично ізольованими від стінок вакуумної камери.

IV. Блок живлення, має бути спроможним подавати напругу від сотні вольт до одного кіловольта при малому струмі який сягає декілька ампер.

V. Підкладки, на які наноситься тонка плівка з матеріалу мішені.

На Рис. 2.4 зображена система для проведення катодного розпилення.

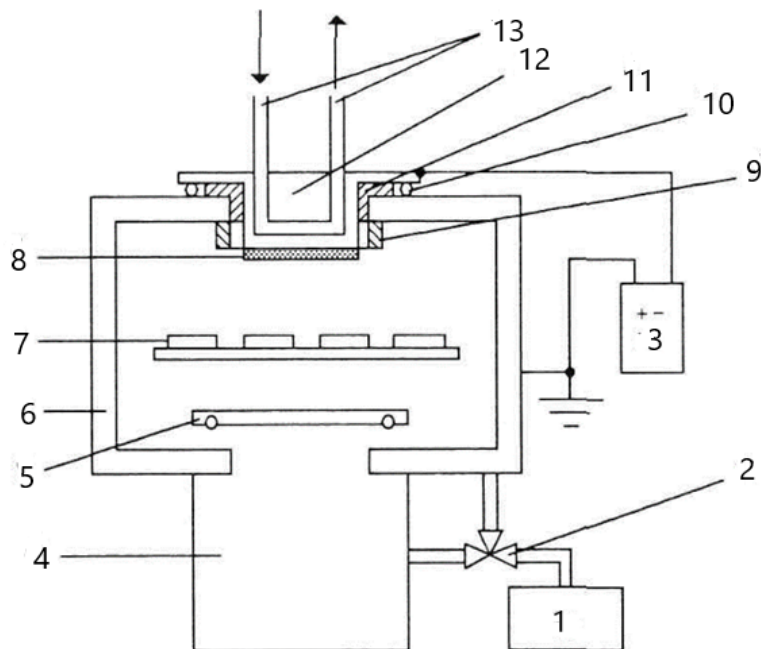


Рис. 2.4 Вакуумна система: 1 – форвакуумний насос, 2 – клапан, 3 – блок живлення, 4 – дифузійний або турбовакуумний насос, 5 – клапан високого вакууму, 6 – вакуумна камера, 7 – підкладки, 8 – мішень, 9 – екрани, 10 – вакуумна прокладка, 11 – ізолятор, 12 – катод, 13 – охолодження.

Газ

Як говорилось раніше, атоми матеріалу мішені вибиваються внаслідок бомбардування іонами газу, що заряджені позитивно. Якщо для катодного розпилення в якості робочого газу використовувати кисень, то процес

окислення вибитих атомів буде інтенсивним. Відповідно, замість чистого металу на підкладках осідатиме його оксид. Тому важливим є використання інертних газів. Це може бути аргон через свою велику атомну масу.

Вакуум

Можна відмітити те, що для процесу катодного розпилення придатним є не довільний тиск, що менший за атмосферний. За нормальних умов робочий тиск при катодному розпиленні варіюється в межах від 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-2}$ мбар. Створення стабільної плазми при тиску менше цієї норми неможливе. Якщо тиск більший норми то вибиті атоми мішені інтенсивно взаємодіють з іонами плазми. В наслідок цього ефективний процес напилення унеможлиблюється.

Катод

Частка кінетичної енергії іонів аргону при катодному розпиленні витрачатиметься на видалення атомів мішені. Інша ж її частина буде витрачатись на її нагрівання. Тому важливим є забезпечення ефективного водяного охолодження мішені для того, щоб остання не розплавилася протягом технологічного процесу.

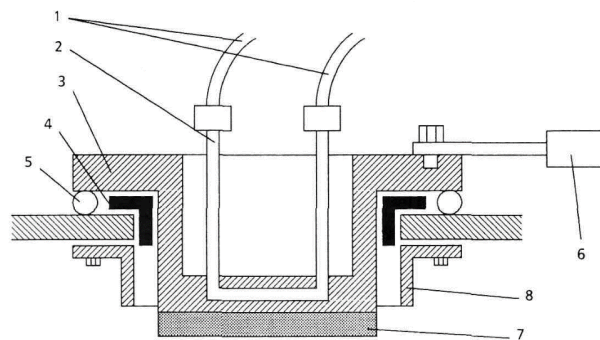


Рис. 2.5 Схематичне зображення катода 1 – пластмасові трубки, 2 – вода для охолодження, 3 – катод, 4 – ізолятор, 5 – прокладка, 6 – подача напруги, 7 – мішень, 8 – екрани.

Блок живлення постійної напруги

Основною вимогою джерела живлення постійної напруги є забезпечення подачі достатньої напруги для протікання струму крізь плазму у газовій камері.

Через плазму струм визначається її електричним опором. Цей опір залежить від типорозміру катода та тиску робочого газу. Варто зауважити, що під час використання постійної напруги живлення високовольтного джерела є можливим проведення процесу катодного розпилення виключно з струмопровідних мішеней.

Високочастотний блок живлення

Можливе використання високочастотного блоку живлення при катодному розпиленні мішеней які виготовлені з діелектриків та струмопровідних матеріалів. Переважно високочастотні блоки живлення працюють на дозволений промисловій частоті, що рівна 13,56 МГц.

Магнетрон

Катод, в якому зовнішнє магнітне поле використовується для викривлення траєкторії руху електронів називається магнетроном (рис. 2.6). Ефективність іонізації робочого газу суттєво підвищується під дією зовнішнього магнітного поля внаслідок збільшення концентрації електронів біля поверхні мішені.

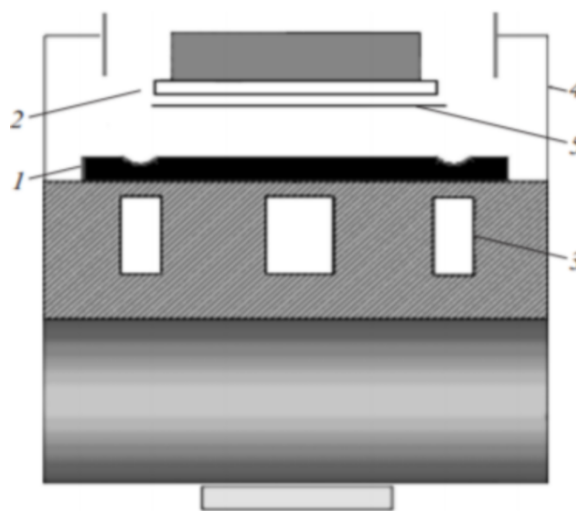


Рис. 2.6 Схема магнетрона: 1 – мішень, 2 – підкладки (закріплені на аноді), 3 – магніти (кільцевий і центральний), 4 — обмежувач плазми екран, 5 — заслонка.

Якщо використовувати Ar в якості робочого газу відбувається напилення плівки чистого матеріалу мішені. Проте є потреба отримання тонких плівок хімічних сполук: нітрідів та оксидів. В даному випадку до аргону додається

відповідний реактивний газ у потрібній кількості. Щоб робоча суміш була однорідною, реактивний газ подають спеціальними трубками якнайближче до поверхні мішені.

Завдячуючи високій кінетичній енергії вибитих атомів мішені, плівки, які були напилені методом катодного розпилення володітимуть досконалою структурою, хорошою адгезією до підкладок і незначною пористістю. Це забезпечує їх обширне використання у технології напівпровідникового приладобудування.

2.3 Вимірювання електричних властивостей гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO

Вимірювання $R(T)$ та питомої електропровідності σ проводяться з використанням електрометричного підсилювача, електричний опір якого 10^{12} Ом. Зображення принципової схеми є на Рис. 2.7.

Змінний опір R_1 дає змогу плавно змінювати струм через зразок, а комутатор Π_1 - змінювати напрямок струму, для уникнення термо е.р.с. у випадку зміни електропровідності. Контролювання температури зразка здійснюється з допомогою мідь-константанової термопари. Нагрівання зразка здійснюється з допомогою електричної пічки, що живиться від стабілізованого джерела напруги. Щоб підтримувати постійну температуру зразка використовується терморегулятор. Усі виміри зводяться до визначення спаду напруги на еталонному опорі R ($10^3 \dots 10^{10}$ Ом) та досліджуваному зразку. Після вимірювань обраховується середнє значення електропровідності для двох пар контактів та двох напрямків струму. Для точнішого визначення середніх значень σ , напругу вимірюють з допомогою двох пар контактів, які розташовані перпендикулярно до струмових контактів.

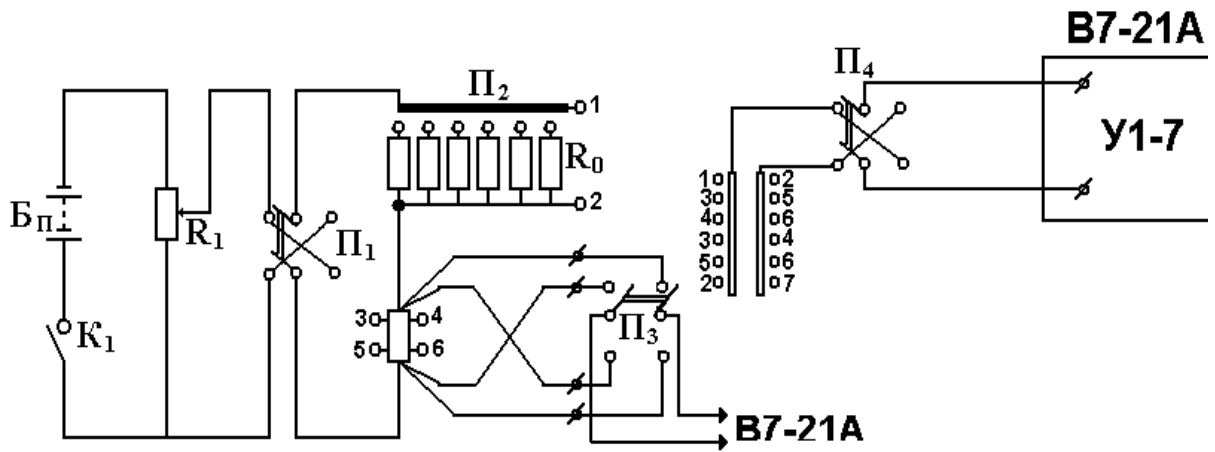


Рис. 2.7. Принципова схема вимірювальної установки.

Формула для обчислення питомої електропровідності:

$$\sigma = \frac{l}{R_0 S} \frac{U_0}{U_\sigma}, \quad (2.1)$$

де l - відстань між контактами (зондами);

U_0 - спад напруги на еталонному опорі;

U_σ - спад напруги на відповідних контактах (зондах);

S - площа поперечного перерізу зразка.

2.3 Чотирьохзондовий метод вимірювання поверхневого опору

Встановлюючи залежність поверхневого опору наших експериментальних зразків від концентрації кисню відбувалося дослідження електричних властивостей отриманої гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO напиленої методом реактивного магнетронного напилення.

Точність вимірювання буде визначатись відстанню між зондами. Для більшої точності вимірювання зонди не будуть розміщуватись в пряму лінію, а формується з них квадрат.

Методом чотирьох зондів проводилося вимірювання поверхневого опору для тонких плівок.

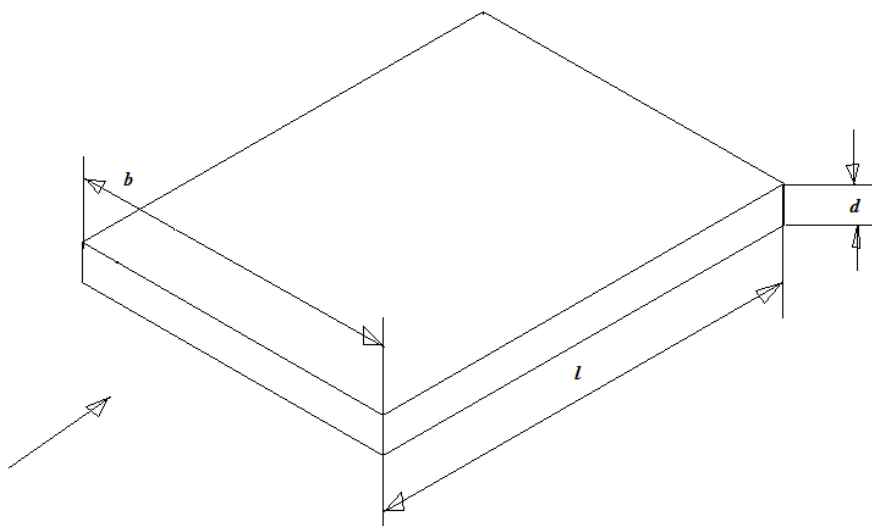


Рис. 2.8 Визначення поверхневого опору

З Рис. 2.8 можемо побачити, що опір частини плівки, який має прямокутний переріз, можна задати формулою:

$$R = \rho l / db \quad (2.2)$$

Якщо $l = b$ тоді :

$$R = \rho / d = R_s \quad (2.3)$$

і тому опір R_s одного квадрату плівки не залежить від розмірів квадрату, а від питомого опору і товщини. R_s - поверхневий опір плівки і виражається в омах на квадрат. В більшості випадків для порівняння плівок які виготовлені з одного матеріалу чи осаджені при однакових умовах використовується задана величина. У випадках коли відома товщина досліджуваних плівок, питомий опір визначається за допомогою виразу

$$\rho = dR_s \quad (2.4)$$

Найлегший спосіб вимірювання R_s опирається на одержанні прямокутного зразка плівки та вимірюванні її електричного опору R .

Тому поверхня плівки, між електричними контактами, розділяється на n однакових квадратів, що дозволяє визначити величину R_s

$$R_s = R / n \quad (2.5)$$

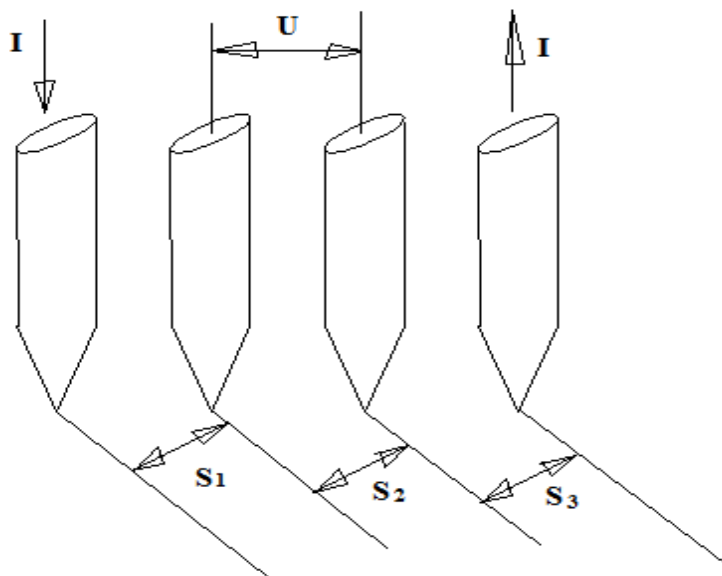


Рис. 2.9 Визначення поверхневого опору чотирьохзондовим методом.

Вимірювання опору ряду квадратів хоть є найлегшим методом, але перевага надається методу, для якого не потрібно виготовляти спеціальні зразки для здійснення вимірювань.

Особливо може з'явитись необхідність виміру поверхневого опору в різних ділянках поверхні тонкої плівки. Тим самим чотирьохзондовий метод набув широкого застосування для отримання значення поверхневого опору Рис. 2.10.

При розміщенні зондів на матеріалі напівбескінечного об'єму питомий опір, у випадку $S_1 = S_2 = S_3 = S$ виражається формулою:

$$\rho = U \cdot 2\pi S / I \quad (2.6)$$

Якщо матеріал, на який розташовуються зонди, являється безкінечно тонкою пластиною на ізолюючій підкладці, то вираз (2.6) набуде вигляду:

$$\rho = U d \pi / I \ln 2 \quad (2.7)$$

або

$$\rho / d = R_s = 4,53 U / I \quad (2.8)$$

РОЗДІЛ 3. Обговорення результатів

3.1. Вольт-амперні характеристики гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO. Електричні властивості гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO

На рис.3.1. представлені вольт-амперні характеристики при різних температурах гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO. Досліджувані структури володіли яскраво вираженими випрямляючими властивостями.

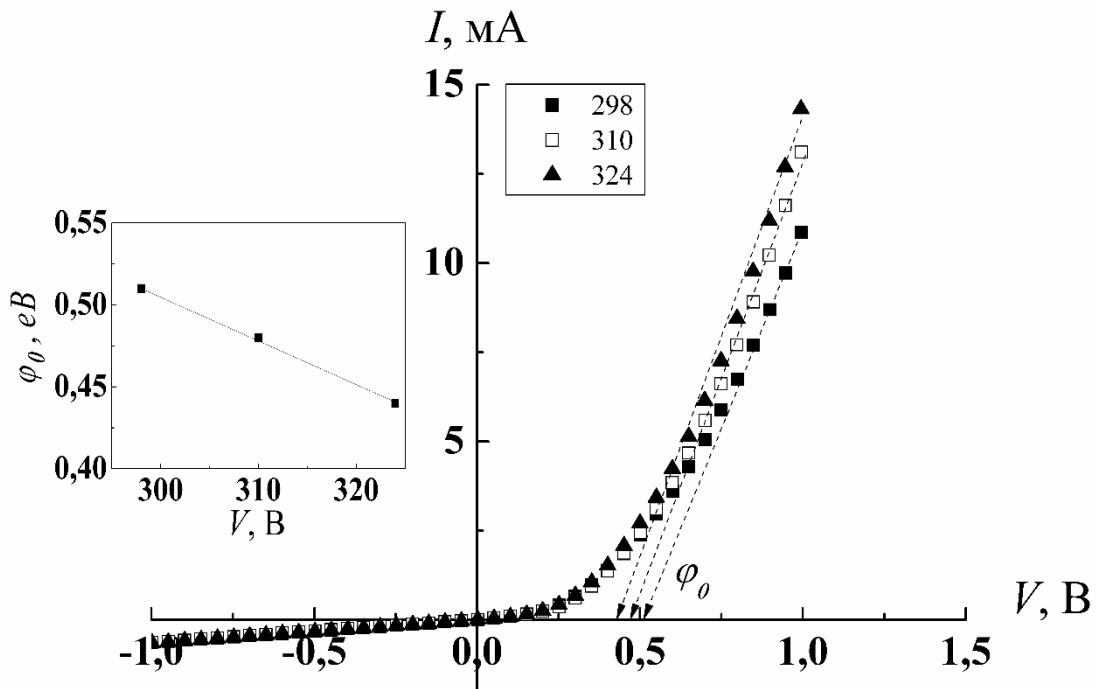


Рис. 3.1. Вольт-амперні характеристики гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO.

Температурна залежність висоти потенціального бар'єру на вставці.

Шляхом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ до перетину з віссю напруги визначені значення висоти потенціального бар'єру ϕ_0 гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO при різних температурах ($\phi_0 = eV_{bi}$, де V_{bi} - контактна різниця потенціалів) (вставка рис. 3.1). Встановлено, що температурна залежність висоти потенціального бар'єру гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO добре описується рівнянням:

$$\phi_0(T) = \phi_0(0) - \beta_\phi \cdot T, \quad (3.1)$$

де $\varphi_0(0) = 1,31$ еВ - значення висоти потенціального бар'єру досліджуваної гетероструктури при абсолютному нулі температури, $\beta_\varphi = 2,7 \cdot 10^{-3}$ еВ $\cdot$ К $^{-1}$ - температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єру.

Величину послідовного опору R_s гетероструктури p -CdTe/MoN/ITO визначено з нахилу прямої гілки вольт-амперної характеристики в області напруг більше висоти потенціального бар'єру де криві $I = f(V)$ переходять з експоненційної залежності в лінійну. На рис. 3.2. представлено залежність диференційного опору гетероструктури p -CdTe/MoN/ITO від напруги при різних температурах, з якого було визначено значення шунтуючого опору. Коефіцієнта випрямлення визначався, як відношення струмів при прямому і зворотному зміщенні при сталій напрузі.

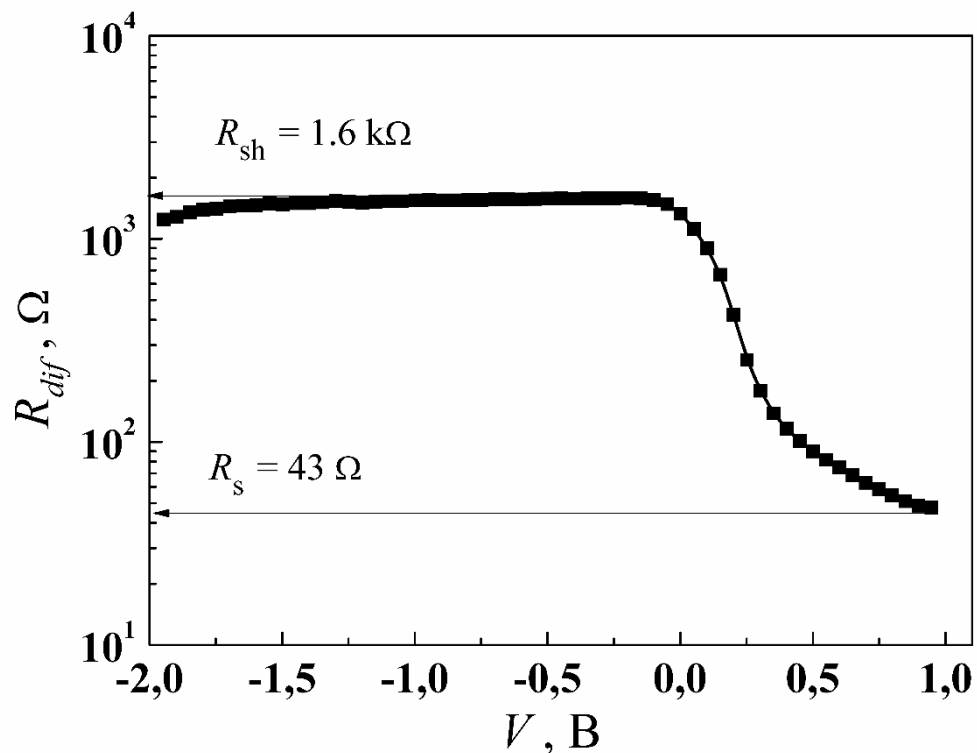


Рис 3.2. Залежність диференційного опору гетероструктури p -CdTe/MoN/ITO від напруги при різних температурах.

3.2. Домінуючі механізми струмопереносу

Прямі гілки вольт-амперних характеристик гетероструктури p -CdTe/MoN/ITO і у напівлогарифмічних координатах при кімнатній

температурі представлено на рис. 3.3 (на вставці представлено її температурну залежність).

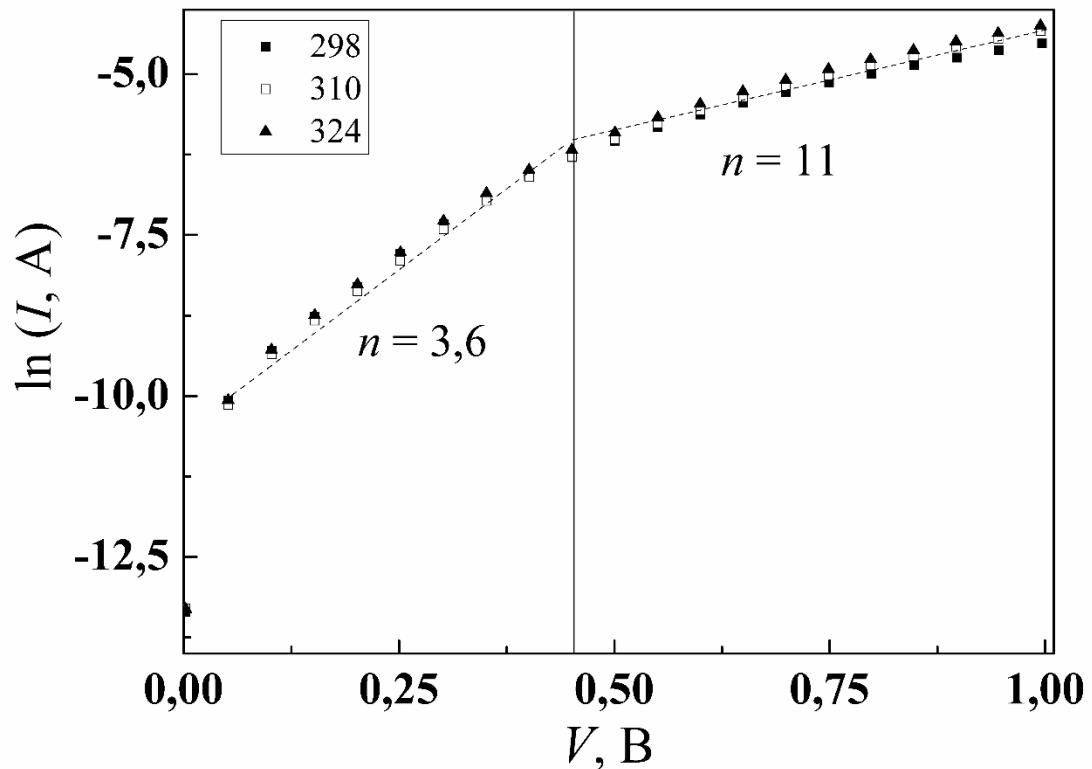


Рис. 3.3. Прямі гілки ВАХ гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO у напівлогарифмічних координатах при кімнатній температурі.

В області прямих зміщень, як видно з рисунку, $V > 3kT/e$ спостерігаються прямолінійні ділянки, що свідчить про експоненційну залежність струму від напруги. Так, як нахил прямолінійних ділянок ($3kT/e < V < 0,45 V$) $\Delta \ln(I)/\Delta V$ не залежить від температури, а визначений коефіцієнт неідеальності n рівний 3,6, то це виключає можливість аналізу струмопереносу базуючись на генераційно-рекомбінаційних процесах в області просторового заряду, адже для цього випадку повинна спостерігатися температурна залежність нахилу прямолінійних ділянок вольт-амперних характеристик у напівлогарифмічних координатах $\Delta \ln(I)/\Delta V = e/nkT$, де n – коефіцієнт не ідеальності [13-15]. Постійний нахил залежностей $\ln(I) = f(V)$ при різних температурах є свідченням тунельної природи механізму струмопереносу. При малих зміщеннях область просторового заряду ще не достатньо тонка для прямого тунелювання, яке

описується формулою Ньюмена. Тому, можна вважати єдиним обґрунтованим механізмом струмопереносу є тунельно-рекомбінаційний механізм [13], при більш високих зміщеннях домінуючим механізмом струмопереносу є тунелювання. Струм при прямому зміщенні визначається наступним виразом:

$$I = B \exp(-A(\phi_0(T) - eV)), \quad (3.2)$$

де α - характеристика матеріалу, B - величина, яка слабо залежить від температури і напруги, ϕ_0 - висота потенціального бар'єру.

Перепишемо вираз (3.2) у іншій формі:

$$I = B \exp(-A\phi_0(T)) \exp(AeV) = I_0 \exp(AeV), \quad (3.3)$$

де $I_0 = B \exp(-A\phi_0(T))$ - струм відсічки, який не залежить від прикладеної напруги. З виразу (3.3) видно, що нахил $\Delta \ln(I)/\Delta V$ початкових ділянок прямих гілок ВАХ зображених на рис. 3.3 визначає коефіцієнт A , який приймає значення 6.8 eV^{-1} .

3.3. Фотоелектричні властивості гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO

На рис.3.4 представлено темнові та світлові вольт-амперні характеристики гетероструктури p-CdTe/MoN/ITO.

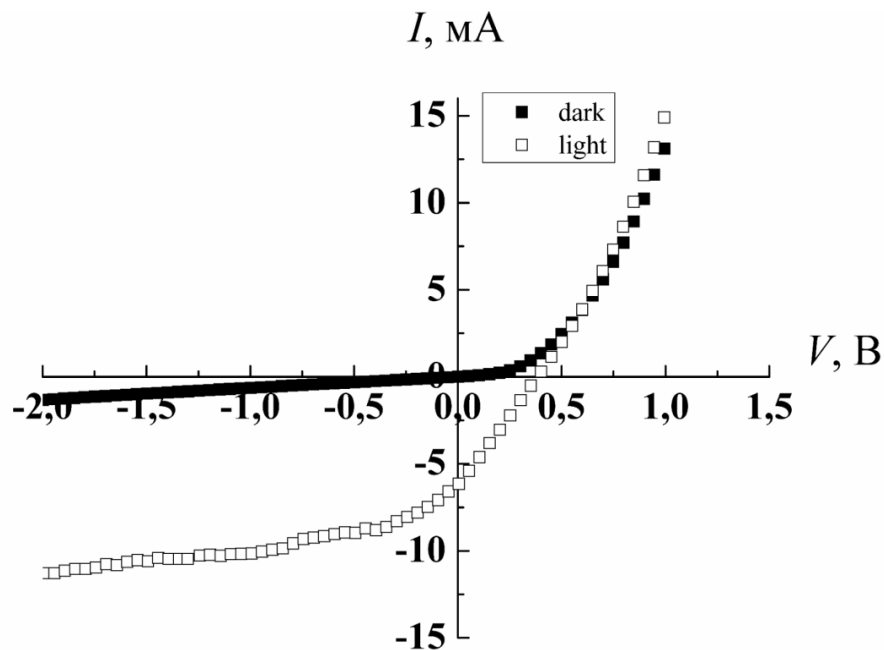


Рис. 3.4. Темнова та світлова ВАХ гетероструктури $p\text{-CdTe/MoN/ITO}$

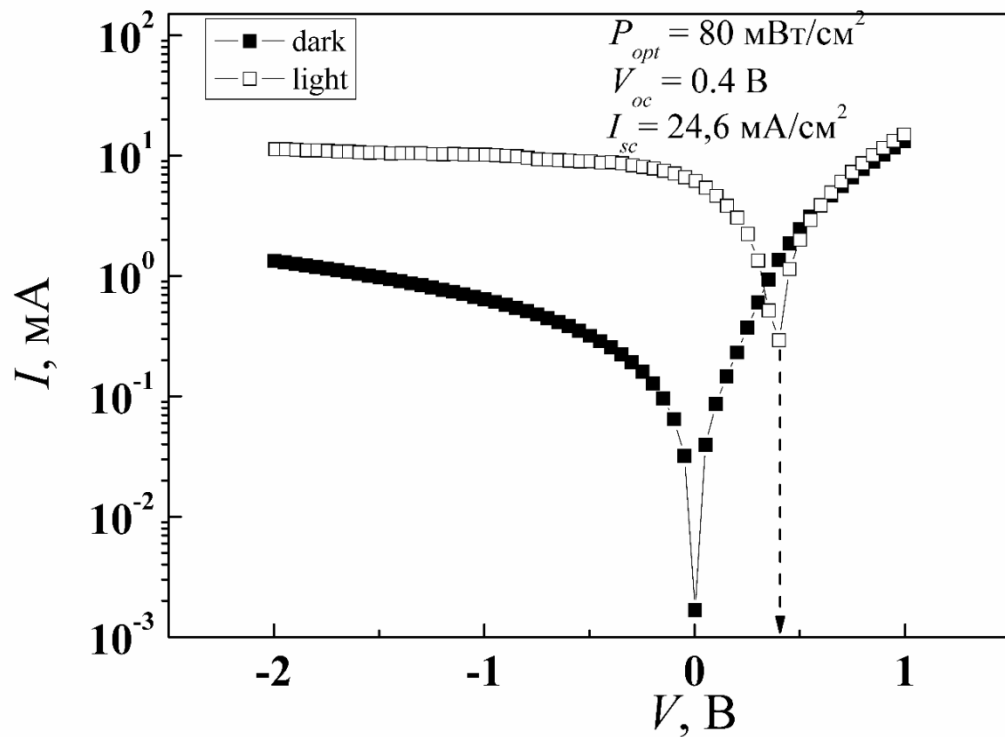


Рис. 3.5. Темнова і світлова вольт-амперна характеристика гетероструктур $p\text{-CdTe/MoN/ITO}$ в напівлогарифмічному масштабі.

Як видно з рис.3.4, при освітленні білим світлом інтенсивністю 80 мВт/см^2 зворотний струм I_{light} зростає в порівнянні з його величиною у темряві I_{dark} . Визначені із залежності $I=f(V)$ параметри гетероструктури мали наступні значення: напруга холостого ходу $V_{oc} = 0.4 \text{ В}$, струм короткого замикання $I_{sc} = 24.6 \text{ мА/см}^2$.

Висновки

1. Досліджено електричні та фотоелектричні властивості гетероструктур $p\text{-CdTe/MoN/ITO}$ отриманих за допомогою реактивного магнетронного розпилення.
2. Виміряно вольт-амперні характеристики гетероструктур $p\text{-CdTe/MoN/ITO}$ при різних температурах, визначено висоту потенціального бар'єру, величини послідовного та шунтуючого опорів.
3. Із аналізу прямих гілок ВАХ гетероструктур $p\text{-CdTe/MoN/ITO}$, встановлено, що домінуючим механізмом струмопереносу при зміщеннях ($3kT/e < V < 0,45 \text{ В}$) є тунельно-рекомбінаційний механізм і тунелювання.
4. Встановлено, що гетероструктури $p\text{-CdTe/MoN/ITO}$ є фоточутливими і можуть бути використані в якості фотодіодів.

Список літератури

1. Корбутяк Д.В. Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості / Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук // К.: Іван Федоров. – 2000. –198 с.
2. Zanio K. Cadmium telluride/ K. Zanio //Semiconductors and Semimetals, 1978.- №13. - P. 1-236
3. Armani N. Defect-induced luminescence in high- resistivity high-purity undoped CdTe crystals / N. Armani, C. Ferrari // J. Phys.: Condens. Matter. -2002, - №14. - P. 13203-13209.
4. Krustokav J. Photoluminescence from deep acceptor-deep donor complexes in CdTe /J. Krustokav, H. Collanb // J. Luminesc. -1997. - №74. - P. 103-105.
5. . Bassani F. Luminescence characterization of CdTe:In grown by molecular beam epitaxy/ F. Bassani, S. Tatarenko // Appl. Phys. Lett. - 1991. - V. 231, № 58 - P. 2651-2653.
6. CdTe and CdZnTe crystals for room temperature gamma-ray detectors / J. Franc, P. Haschl, E. Belas [et all] // Nucl. Instrum. Methods. - 1999. №2 A 434
7. P.E. H. Jehn, The Molybdenum-Nitrogen phase diagram, Journal of the LessCommon Metals. 58 (1978) 85 - 98.
8. T. B. Massalski, H. Okamoto, Binary Alloy Phase Diagrams, in: Anonymous , pp. 2631, 2632.
9. K. Inumaru et al, High-Pressure Synthesis of Superconducting Molybdenum Nitride δ -MoN by in Situ Nitridation, Chemistry of Materials. 20 (2008) 4756-4761.
10. E. Soignard et al, High-pressure synthesis and study of low compressibility molybdenum nitride (MoN and MoN_{1-x}) phases, Physical Review B , 132101. 68 (2003).
11. C. L. Bull et al, Determination of the crystal structure of δ -MoN by neutron diffraction, Journal of Solid State Chemistry. 177 (2004) 1488-1492.

12. Falk G. Sintering of ceramics – new emerging techniques. Ch. 26. Sintering of transparent conductive oxides: from oxide ceramic powders to advanced optoelectronic materials. // InTech. Croatia. - 2012. – p. 587
13. Nisha M. Growth and characteristion of radio frequency magnetron sputtered indium tin oxide thin films // Ph.D thesis in the field of material science. India – 2006.
14. Mohamed S.H., El-Hossary F.M., Gamal G.A., Kahlid M.M. Properties of Indium Tin Oxide Thin Films Deposited on Polymer Substrates // Acta physica polonica A. - 2009. - V.115, No3 - p. 704-708.
15. Pokaipisit A., Horprathum M., Limsuwan P. Influence of annealing temperature on the properties of ITO Fflms prepared by electron beam evaporation and ion-assisted deposition // Kasetsart J. (Nat. Sci.). - 2008. - No42. - p. 362-366.
16. Boonyopakorn N., Sripogpun N., Thanachayanont C., Dangtip S. Effects of substrate temperature and vacuum annealing on properties of ITO films prepared by radiofrequency magnetron sputtering // Chin. Phys. Lett. - 2010. - V.27, No10. – p. 103-108.
17. Balasubramanian N. Subrahmanyam A. Electrical and optical properties of reactively evaporated indium tin oxide (ITO) films dependence on substrate temperature and tin concentration // Journal of applied physics, 1989. – Vol.22. – p. 206-209.
18. Амосова Л. П. Электрооптические свойства и структурные особенности аморфного ИТО // Физика и техника полупроводников, 2015, том 49, вып. 3

Додаток

Техніка безпеки і охорона навколишнього середовища

Для правильного виконання практичних робіт або дослідів з хімії як у шкільній лабораторії при вивченні цього предмета, так і в будь-якій іншій хімічній лабораторії потрібно не тільки розуміти завдання, але й знати техніку лабораторних робіт.

Робота в хімічній лабораторії пов'язана з деякою небезпекою, оскільки багато речовин в той чи іншій мірі отруйні, вогнебезпечні та вибухонебезпечні. Досвід показує, що більшість нещасних випадків, що відбуваються в лабораторії, є наслідком недбалості та неуважності працюючих. Можливість нещасних випадків може бути виключена при виконанні всіх запобіжних заходів. Зазвичай характер запобіжних заходів, що забезпечують безпеку проведення експерименту, залежить від виду роботи. Однак існують загальні правила, виконання яких є обов'язковим для кожного працюючого в лабораторії, незалежно від того, який експеримент він проводить.

Безпечність технологічного процесу

Безпечність виробничих процесів полягає у запобіганні впливу небезпечних і шкідливих факторів на працюючих. Забезпечується це завдяки організаційним заходам (навчання, інструктажі, виконання вимог інструкцій з охорони праці) та технічним засобам безпеки.

Дія технічних засобів захисту повинна забезпечити безпеку працюючих від початку робочого процесу до його закінчення і не має припинитися раніше за дію небезпечного або шкідливого виробничого фактора.

Основними технічними засобами безпеки для запобігання виробничого травматизму є огорожувальні та запобіжні пристрої, блокування, профілактичні випробування машин.

Основні вимоги, що висуваються до технічних засобів безпеки - це підвищення продуктивності праці, зниження небезпеки та шкідливості при обслуговуванні обладнання та виконанні технологічних операцій, надійність і

міцність, зручність під час обслуговування устаткування та засобів захисту, виконання вимог технічної естетики.

Загальні вимоги до виробничих процесів регламентуються ГОСТ 12.3.002-75.

Вони передбачають:

- усунення безпосереднього контакту працівників з вихідними матеріалами, заготовками, напівфабрикатами, готовою продукцією та відходами виробництва, які чинять небезпечну дію;
- заміну технологічних процесів та операцій, пов'язаних з виникненням небезпечних та шкідливих виробничих факторів, процесами та операціями, при виконанні яких ці фактори відсутні або мають меншу інтенсивність;
- комплексну механізацію та автоматизацію виробництва;
- застосування дистанційного керування технологічними процесами та операціями за наявності небезпечних і шкідливих виробничих факторів;
- герметизацію обладнання;
- застосування засобів колективного захисту працівників;
- раціональну організацію праці та відпочинку з метою профілактики, а також зниження важкості праці;
- запровадження системи керування технологічними процесами, які забезпечують захист працівників та аварійне вимкнення виробничого обладнання;
- забезпечення пожежо- та вибухобезпеки.

Загальні вимоги безпеки під час експлуатації систем, що працюють під тиском

На підприємствах різних галузей промисловості широко застосовуються системи, що працюють під тиском. До таких систем належать: парові та водогрійні котли; компресори та повітряозбірники (ресивери); трубопроводи для стисненого повітря, газу та пари; балони та цистерни для транспортування і

зберігання зріджених, стиснених і розчинених газів, а також інші посудини, що працюють під тиском. Вони є джерелами підвищеної небезпеки.

Основна небезпека полягає в тому, що у разі руйнування такої посудини чи апарата може статися значне вивільнення енергії внаслідок раптового адіабатичного розширення газу чи пари - так званий фізичний вибух. Так, потужність вибуху (розриву) посудини місткістю 1 м^3 , в якій знаходиться повітря під тиском 1 МПа (10 кгс/см^2), становить близько 13 МВт . Якщо в посудині за тих же умов знаходиться водяна пара, то потужність вибуху (розриву) вже буде близько 200 МВт . У результаті такого вибуху можуть статися значні руйнування та важкі травми у людей.

З огляду на підвищену небезпеку до обслуговування систем (посудин), що працюють під тиском, допускаються особи, які досягли 18-річного віку, пройшли медичне обстеження, навчання за затвердженою програмою, атестовані й мають посвідчення на обслуговування відповідного устаткування (посудини, апарата).

Причинами аварій (вибухів) балонів із зрідженими, стисненими та розчиненими газами є: дефекти та неточності, допущені при їх виготовленні (дефекти зварних швів, різьби вентиля, горловини балона); перевищення тиску газу в балоні в наслідок його заповнення понад норму; нагрівання балона під дією сонячних променів, нагрівальних приладів, відкритого вогню, надзвичайно швидкого наповнення газом; падіння та удари балонів; помилкове наповнення балона іншим газом; швидкий відбір газу з балона, який може спричинити іскри у струмені газу; потрапляння мастила на вентиль кисневого балона та ін. Нещасні випадки (травмування) найчастіше стаються під час транспортування, завантаження та у разі падіння балонів.

Безпечна експлуатація балонів забезпечується:

- необхідною механічною міцністю балонів і належним контролем за їх станом;

- запобіганням помилкового наповнення балонів іншими газами (наприклад, балонів для негорючих газів - горючими; балонів для горючих газів - киснем);
- дотриманням правил наповнення, транспортування, зберігання та використання балонів.

Протипожежна устаткування

1. При проведенні дослідів, в яких може статися самозаймання, необхідно мати під руками пісок або інші засоби гасіння вогню.
2. У разі займання горючих речовин потрібно швидко погасити всі джерела вогню, відставити посудину з вогнєнебезпечною речовиною і гасити пожежу.

Техніка безпеки при роботі з електроприладами

1. Всі роботи треба проводити тільки із заземленими електроприладами.
2. Категорично забороняється працювати поблизу відкритих струмопровідних частин.
3. Забороняється вішати на розетки, вимикачі і електропроводи різні речі.
4. В разі перерви в подачі струму всі електроприлади та інше електрообладнання повинні бути відключеними.
5. При загорянні проводів або електроприладів необхідно їх негайно знеструмити і гасити вогонь за допомогою сухого вуглекислотного вогнегасника.

Техніка безпеки при роботі з розчинами кислот і лугів

1. При приготуванні розбавлених розчинів лугу і кислоти необхідно переливати їх у воду тонким струменем при безперервному перемішуванні.
Доливати воду в кислоту забороняється!

2. Якщо кислота або луг випадково проліті, їх спочатку засипають піском. Кислоту нейтралізують розчином соди, луги - слабким розчином оцтової кислоти. Після цього місце промивають водою і витирають насухо.

3. Відпрацьовані кислоти і луги слід збирати в спеціальний посуд.

Надання першої медичної допомоги

1. При опіку кислотами обпечене місце слід промити великою кількістю води, потім обробити 2%-ним розчином бікарбонату натрію (харчової соди), змастити вазеліном і перев'язати. При опіках очей багаторазово промити їх водою,

2%-ним розчином соди і звернутися до лікаря.

2. При опіку лугом уражене місце багаторазово промити з водою, а потім 2%-ним розчином оцтової або борної кислоти, змастити вазеліном або 5%-ним розчином перманганату калію і перев'язати. При опіку очей промити їх 1%-ним розчином борної кислоти.

3. При термічному опіку змочити постраждалу ділянку 10%-ним розчином перманганату калію, потім змастити маззю від опіків, вазеліном або розчином харчової соди, перев'язати.

4. При отруєнні хлором, бромом, сірководнем, чадним газом необхідно вивести постраждалого на повітря.

5. Під час всіх нещасних випадків слід негайно звернутися до викладача або чергового інженера.