

**Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича**

Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Кафедра електроніки і енергетики

**Вплив температури на фізичні властивості гетероструктури
 $\text{Cu}_2\text{O} / \text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$**

**Кваліфікаційна робота
ОР «Бакалавр»**

Виконав: студент 4 курсу, групи 433

Напрямок підготовки – 6.050701 Електротехніка та
електротехнології

(шифр і назва спеціальності)

Шпинтук І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Козярьський Д.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри №

від „ ” червня 2019 р.

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

Анотація

В даній роботі досліджено вплив температури на фізичні властивості гетероструктури $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te} :<\text{Zn}> (x=0,1)$.

Використовуючи різні режими напилення, тобто змінюючи час напилення та температуру підкладки, за допомогою високочастотного магнетронного розпилення було отримано плівки Cu_2O товщиною 60 та 120 нм.

Із оптичних досліджень встановлена наявність прямих дозволених оптичних переходів та визначено оптичну ширину забороненої зони плівок Cu_2O (2,5-2,58 еВ). Дослідження електричного опору отриманих плівок показали, що він сягає значень 0,5 - 90 Ом×см в залежності від режиму напилення тонких плівок.

На основі експериментальних даних отримано гетероструктуру

p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ із ВАХ якої було визначено визначено $\phi_0(0\text{ K})=1,49\text{ eV}$ та коефіцієнт $B_\phi = 2,41 \times 10^{-3} \text{ eV} \times \text{K}^{-1}$, коефіцієнт випрямлення $RR \sim 10^3$ ($|U|=2\text{ V}$, $T=296\text{ K}$). Із залежностей ВАХ побудованих у напівлогарифмічних координатах визначено коефіцієнт неідеальності ВАХ та встановлено домінуючі механізми струмопереносу.

Робота написана українською мовою і містить: 40 сторінок; 2 таблиці; 18 рисунків та схем; 12 бібліографічних найменувань.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 Теоретична частина.....	5
1.1 Основні властивості напівпровідникових матеріалів.....	5
1.2 Причини, умови і методи утворення напівпровідникових кристалів.....	7
1.3 Фізико-хімічні властивості елементарних складових p-Cu ₂ O/n-Cd _{1-x} Zn _x Te	12
1.4 Електричні та оптичні властивості CdTe та ZnTe.....	13
1.5 Фізико-хімічні властивості кристалів CdZnTe.....	15
1.6 Методи отримання та властивості плівок оксиду міді.....	16
РОЗДІЛ 2 Експериментальна частина.....	18
2.1 Методика експерименту.....	18
2.2 Метод Бріджмена-Стокбаргера.....	19
2.3 Установка по одержанню тонких плівок Cu ₂ O методом ВЧ магнетронного розпилення.....	22
РОЗДІЛ 3 Результати дослідження та їх обговорення.....	25
3.1 Оптичні властивості тонких плівок Cu ₂ O.....	25
3.2 Електричні властивості гетероструктури Cu ₂ O/Cd _{1-x} Zn _x Te.....	27
Висновки.....	33
Список літератури	34
Додаток.....	37

ВСТУП

Оксид міді в якості матеріалу електротехніки застосовується із 20-х – 30-х років минулого століття, так до прикладу на основі оксидів міді збудовані перші випрямлячі. Але як матеріали для сонячної енергетики оксиди міді почали широко обговорювати досить недавно [1-5].

Основними перевагами плівок оксидів міді, як матеріалів електроніки та сонячної енергетики є їх нетоксичність для людини, велика кількість способів отримання, дешевизна міді за рахунок її широкого розповсюдження. Крім того оксиди міді можна використовувати в газочутливих сенсорах, літій-іонних батареях, фотоелементах та ін.

В останні роки основним питанням розширення меж застосування оксидів міді в сонячній енергетиці та електроніці є поліпшення оптичних, електричних і структурних характеристик цих оксидів [6, 12]. Їх особливістю є те, що в залежності від вмісту кисню оксид міді сильно змінює свої властивості (тип провідності, ширина забороненої зони) [5, 19].

Останнім часом з'явився великий інтерес до кристалів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, особливо в якості матеріалу для детекторів ядерного випромінювання. Ці кристали часто мають більш високу однорідність електрофізичних характеристик за обсягом кристала і до того ж більш широку заборонену зону, ніж кристали CdTe , що дозволяє значно підвищити величину напруженості електричного поля в детекторах та істотно поліпшити характеристики приладів.

Було цікавим дослідити залежність електричних і оптичних властивостей тонких плівок Cu_2O від технологічних режимів їх отримання методом ВЧ-магнетронного розпилення[20].. Крім того для встановлення можливості практичного використання одержаних плівок оксиду міді була створена гетероструктура $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ та досліджені її електричні властивості. Тверді розчини $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ з низькими значеннями x були обрані в якості базової підкладки через їх більш високу механічну міцність і структурну досконалість[14, 15].

РОЗДІЛ 1. Теоретична частина

1.1 Основні властивості напівпровідникових матеріалів.

Напівпровідниками є речовини, що займають по величині питомої провідності проміжне положення між провідниками і діелектриками. Ці речовини володіють як властивостями провідника, так і властивостями діелектрика. Разом з тим вони володіють рядом специфічних властивостей, що різко відрізняють їх від провідників і діелектриків, основним з яких є сильна залежність питомої провідності від дії зовнішніх факторів (температури, світла, електричного поля та ін.)

До напівпровідників відносяться елементи четвертої групи періодичної таблиці Менделєєва, а також хімічні сполуки елементів третьої й п'ятої груп типу АІІ ВV (GaAs, InSb) і другої й шостої груп типу АІІ В VI (CdS, BbS, CdFe, ZnTe, CdTe) іпотрійні сполуки та тверді розчини на їх основі (CdZnTe, CdMgTe), які є воістину невичерпним джерелом напівпровідникових матеріалів з широким спектром фізико-хімічних властивостей. Хімічні зв'язки в потрійних напівпровідникових з'єднаннях, так само як і в подвійних, носять змішаний ковалентно-іонний або ковалентно-іонно-металевий характер. Специфіка зв'язків обумовлена наявністю атомів трьох сортів. Потрійні напівпровідникові з'єднання можуть бути розділені на одноаніонні (двокатіонні) і двоаніонні (однокатіонні). Прикладом одноаніонних з'єднань можуть служити з'єднання типу АІІВІVCV₂, АІВІV₂CV₃ і двоханіонних — АІІ₂ВVCV_{II}, АІІ₂ВІVCIV. Напівпровідники бувають з різною електропровідністю: власна та домішкова провідність.

Напівпровідники, у яких вільні електрони і «дірки» з'являються в процесі іонізації атомів, з яких побудований весь кристал, називають напівпровідниками з власною провідністю. У напівпровідниках з власною провідністю концентрація вільних електронів дорівнює концентрації «дірок».

Для створення напівпровідникових приладів часто використовують кристали з домішковою провідністю. Такі кристали виготовляються за допомогою внесення домішок з атомами тривалентного або п'ятивалентного хімічного елемента.

Домішкова провідність поділяється за типом провідності. Електронні напівпровідники (n-типу) та (р-типу).

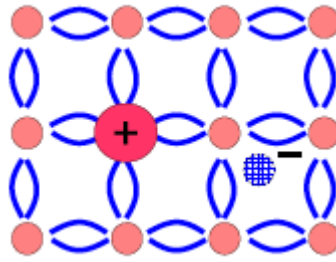


Рис.1.1. Кристалічна гратка напівпровідника (n-типу) провідності

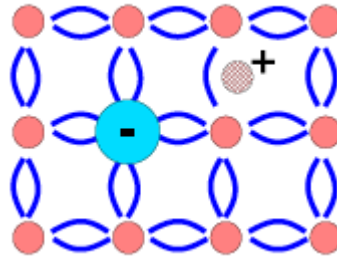


Рис.1.2. Кристалічна гратка напівпровідника (р-типу) провідності

Напівпровідник n-типу. Термін «n-тип» походить від слова «negative», що позначає негативний заряд основних носіїв. Цей вид напівпровідників має домішкову природу. У чотирьохвалентний напівпровідник (наприклад, кремній) додають домішку п'ятивалентного напівпровідника (наприклад, миш'яку). У процесі взаємодії кожен атом домішки вступає в ковалентний зв'язок з атомами кремнію. Однак для п'ятого електрона атома миш'яку немає місця в насичених валентних зв'язках, і він переходить на дальню електронну оболонку. Там для відриву електрона від атома потрібна менша кількість енергії. Електрон відривається і перетворюється в вільний. В даному випадку перенесення заряду здійснюється електроном, а не діркою, тобто даний вид напівпровідників проводить електричний струм подібно металам. Домішки, які додають в напівпровідники, внаслідок чого вони перетворюються в напівпровідники n-типу, називаються донорними.

Напівпровідник p-типу. Термін «p-тип» походить від слова «positive», що позначає позитивний заряд основних носіїв. Цей вид напівпровідників, крім домішкової основи, характеризується дірковою природою провідності. У чотирьохвалентний напівпровідник (наприклад, в кремній) додають невелику кількість атомів тривалентного елемента (наприклад, індію). Кожен атом домішки

встановлює ковалентний зв'язок з трьома сусідніми атомами кремнію. Для установки зв'язку з четвертим атомом кремнію в атома індію немає валентного електрона, тому він захоплює валентний електрон з ковалентного зв'язку між сусідніми атомами кремнію і стає негативно зарядженим іоном, внаслідок чого утворюється дірка. Домішки, які додають в цьому випадку, називаються акцепторними.

Властивості напівпровідників залежать від способу отримання, так як різноманітні домішки у процесі отримання монокристалів можуть впливати на них. Також створюють компенсовані напівпровідники з тим щоб зафіксувати рівень Фермі у середині забороненої зони, р-n-переходи можуть бути отримані декількома методами.

1.2 Причини, умови і методи утворення напівпровідникових кристалів

Матеріальні частинки (атоми, молекули, іони), що складають газоподібні або рідкі (розплавлені) речовини, володіючи високою кінетичною енергією, знаходяться в безперервному русі. Час від часу вони стикаються, утворюючи зародки – мікроскопічні фрагменти майбутньої структури. Найчастіше такі зародки розпадаються, що пов'язано або з власними коливаннями, або з бомбардуванням їх вільними частинками. Однак для початку кристалізації необхідно, щоб зародок досяг критичної величини, тобто містив таку кількість частинок, при якому приєднання наступної частинки зробило б розростання зародка енергетично більш вигідним, ніж його розпад. Така можливість для більшості речовин проявляється або зі зниженням температури, в результаті чого зменшуються температурні коливання, або з підвищенням концентрації речовини в розчині або газі, що призводить до збільшення ймовірності зустрічі частинок один з одним, тобто до виникнення зародків.

Таким чином, зростання кристалів можна розглядати як процес, за допомогою якого найдрібніші кристалічні частинки-зародки – досягають макроскопічних розмірів. Причому кристалізація протікає не у всьому обсязі, а лише там, де виникнуть зародки. Фактор, що впливає на появу зародків, є не тільки переохолодження і підвищення концентрації розчину або в'язкості розплаву, але і присутність сторонніх уламків кристалів або пилинок, на поверхні яких збираються частинки, спрощуючи цим початок кристалізації.

Процес кристалізації є енергетично вигідним. Зростаючий кристал не приймає рівноважну форму внаслідок того, що на нього впливають різні мінливі умови кристалізації: температура, тиск, сила тяжіння, хімічний склад і динаміка середовища і т. д.

Для отримання кристалічних речовин зі строго визначеною точкою плавлення полікристали досліджуваної речовини розплавляють, а потім повільно знижують температуру розплаву нижче точки плавлення.

Методи вирощування кристалів, технологічна реалізація процесу кристалізації з метою отримання монокристалів і плівок різних речовин. У промисловості і дослідницьких лабораторіях кристали вирощують з пари, розчинів, розплавів, з твердої фази і іншими способами, наприклад, синтезують шляхом хімічних реакцій, при високих тисках, здійснюють електролітичну кристалізацію, кристалізацію з гелів та ін. Основними методами отримання досконалих кристалів великого діаметру є методи вирощування з розплаву, з розчинів і паровий (газової) фази.

- Вирощування монокристалів з розплаву

Найбільш поширені способи вирощування монокристалів. В даний час більше половини технічно важливих кристалів вирощують з розплаву. Цими методами вирощують елементарні напівпровідники і метали, оксиди, галогеніди, халькогеніди, вольфрамати, ванадати, ніобати та інші речовини. В ряді випадків з розплаву вирощуються монокристали, до складу яких входить п'ять і більше компонентів. Наявність альтернативних методів вирощування кристалів з розплаву дозволяє на підставі порівняльного аналізу їх основних технологічних характеристик правильно вибрати той чи інший метод отримання кристалів з різними властивостями.

Речовинами, найбільш придатними для вирощування з розплаву, є ті, які плавляться без розкладання, не мають поліморфних переходів і характеризуються низькою хімічною активністю. При кристалізації з розплаву важливо враховувати процеси, що впливають на склад розплаву (термічна дисоціація, випаровування, взаємодія розплаву з навколишнім середовищем), процеси на фронті кристалізації, процеси теплопереносу в кристалі і розплаві, процеси масопереносу (перенесення домішок, обумовлений конвекцією і дифузією в розплаві).

Перевага методу витягування з розплаву у порівнянні з іншими методами полягає в тому, що кристал росте у вільному просторі без контакту зі стінками тигля, при цьому досить легко можна змінювати діаметр зростаючого кристала і візуально контролювати зростання. Методами витягування з розплаву в даний час вирощують більшість напівпровідникових (кремній, арсенід галію, фосфід і арсенід індія та ін) і діелектричних матеріалів, синтетичних кристалів дорогоцінних каменів. Технологічні особливості проведення процесу визначаються властивостями вирощуваного матеріалу і вимог, як за геометричними параметрами, так і за фізико-хімічними властивостями, що пред'являються до монокристали.

- Кристалізація з розчинів

Під кристалізацією з розчинів мається на увазі зростання кристала сполуки, хімічний склад якого помітно відрізняється від хімічного складу вихідної рідкої фази. Розчинниками можуть бути вода, багатоконпонентні водні і неводні розчини, розплави будь-яких хімічних сполук. Залежно від температури процесу і хімічної природи розчинника розрізняють процеси вирощування з низькотемпературних водних розчинів (при температурах не вище 80-90°C), перегрітих водних розчинів (гідротермальний метод, температури до 800°C), сольових розплавів (методи кристалізації з розчину в розплаві, температури кристалізації до 1500°C).

Кристалізацію з розчинів застосовують при вирощуванні речовин, що розкладаються при температурах нижче температури плавлення або мають кілька поліморфних модифікацій. Зростання кристалів здійснюється при температурах нижче температури плавлення, тому в вирощених такими методами кристалах відсутні дефекти, характерні для кристалів, вирощених з розплаву. При вирощуванні кристалів з розчинів рушійною силою процесу є пересичення, рівень якого характеризує величина переохолодження ДП.

Кристалізацію з розчинів можна здійснювати за рахунок зміни температури розчину, за рахунок зміни складу при кристалізації за рахунок концентраційної конвекції обмін між зонами розчинення і зростання забезпечується за рахунок різниці густин насиченого і ненасиченого розчину. Живильна речовина поміщається в верхню частину кристалізатора, а затравка підвішується внизу. Температура у верхній зоні більш висока, ніж в нижній, тому теплова конвекція пригнічується.

Насичений більш щільний розчин опускається з верхньої камери в нижню, стає пересиченим і відбувається зростання кристалів.

У методі кристалізації при випаровуванні розчинника пересичення створюється за рахунок збільшення концентрації розчиненої речовини при випаровуванні розчинника до значень, що перевищують рівноважне. Процес здійснюється при постійній температурі в строго ізотермічних умовах. У присутності затравочних кристалів процес наростання пересичення регулюється зростаючим кристалом. Швидкості кристалізації дуже малі. Процес вирощування кристалів таким способом може досягати кілька тижнів.

Кристалізація при хімічній реакції заснована на виділенні твердих продуктів в процесі взаємодії розчинених компонентів. Такий спосіб кристалізації можливий лише в тому випадку, якщо розчинність одержуваного кристала буде нижче розчинності вихідних компонентів. Зазвичай хімічні реакції в розчині протікають з досить великою швидкістю, створюються високі пересичення і відбувається масове виділення дрібних кристалів. Обмеження швидкості досягається або використанням слабо розчинених вихідних продуктів, або регулюванням швидкості надходження речовин в зону реакції.

Кристалізація при електрохімічній реакції може розглядатися як окремий випадок кристалізації шляхом хімічної реакції, в якій беруть участь електрони. Типовим прикладом є виділення металів в електролітичній ванні. Електрокристалізація в основному використовується для осадження металів. Цей метод отримав розвиток при поєднанні способу витягування кристала з розплаву при одночасному його електролізі (електрохімічний спосіб Чохральського). В цьому випадку зростаючий кристал є одним з електродів, і повинен володіти досить високою електропровідністю при температурі вирощування. Цим способом можна вирощувати кубічні кристали натрій-вольфрамових бронз з розплаву, а також використовувати кристалізацію при хімічній реакції.

- Кристалізація з парової (газової) фази

Широко використовується для вирощування як масивних кристалів, так і епітаксійних плівок, тонких (полікристалічних або аморфних) покриттів, ниткоподібних і пластинчастих кристалів. Конкретний метод вирощування

вибирають в залежності від матеріалу. Методи вирощування масивних кристалів універсальні, практично для будь-якої речовини може бути підібраний такий процес, який би забезпечив зростання монокристала.

У методах вирощування, заснованих на фізичній конденсації кристалізованої речовини, речовина надходить до зростаючого кристалу у вигляді власної пари, що складається з молекул їх асоціацій-димерів, тримерів і т. д.

Залежно від способу доставки речовини в зону кристалізації розрізняють чотири основних методи: метод молекулярних пучків у вакуумі, метод катодного розпилення, метод об'ємної парової фази в замкнутій системі і кристалізацію в потоці інертного газу.

У методі молекулярних пучків нагрітий до високої температури у вакуумі компактний джерело випускає атоми або молекули, які поширюючись за законами геометричної оптики, потрапляють на підкладку, де і відбувається конденсація. Високу локальну температуру дозволяє отримати електронно-променевий нагрів випаровуючої речовини. Фокусуючи електронний промінь, нагрівають малу ділянку на порівняно масивному злитку випаровується речовини, іноді доводячи його до плавлення. Випарник і підкладку поміщають в камеру з холодними стінками, в якій забезпечують високий вакуум. Якщо на шляху частинок помістити екран в отворами («маску»), то він вирізає окремі пучки частинок. Таким способом можна локалізувати кристалізацію на обраних ділянках.

Для підвищення досконалості плівок метод молекулярних пучків комбінують з хімічними методами осадження.

Метод катодного розпилення — гнучкий, легко керований процес. Набув широкого поширення для осадження плівок, як полікристалічних, так і монокристалічних. При використанні варіанту катодного розпилення з використанням тліючого розряду між катодом і паралельним йому заземленим плоским анодом на якому розташовуються підкладки, запалюють розряд. Стаціонарність розряду підтримується завдяки динамічній рівновазі між числом іонів, що нейтралізуються на катоді, і числом нових іонів, що генеруються в плазмі тліючого розряду електронами, емітованими з катода. Ударяються об катод іони вибивають з нього атоми шляхом передачі імпульсу. Ці атоми електрично нейтральні

і досягають анода, практично не зіштовхувалися з молекулами газу. При осадженні на монокристалічну підкладку може бути забезпечене епітаксіальне зростання. Розроблені різні варіанти методу катодного розпилення.

До методів з участю хімічної реакції відносяться методи хімічного транспорту, методи розкладання сполук і методи синтезу в паровій фазі.

У методах хімічного транспорту кристалізується речовина в твердому або рідкому вигляді взаємодіє в зоні джерела з іншою речовиною і перетворюється в газоподібні сполуки, які переносяться в зону з іншою температурою і, розкладаючись по зворотній реакції, виділяють вихідну речовину. У методах розкладання сполук в зону кристалізації вводиться летюча сполука, яке під дією газоподібного відновника і високої температури або будь-якого іншого впливу розкладається з виділенням кристалізується речовини. У методі синтезу в паровій фазі кристалізується з'єднання утворюється в результаті реакції між газоподібними компонентами безпосередньо в зоні кристалізації.

1.3 Фізико-хімічні властивості елементарних складових

p-Cu₂O/n-Cd_{1-x}Zn_xTe

У роботі досліджено вплив умов вирощування на оптичні та електричні властивості тонких плівок Cu₂O. Також досліджено електричні властивості гетероструктури p-Cu₂O/n-Cd_{1-x}Zn_xTe отриманої на основі цих плівок.

- Мідь (Cu)— хімічний елемент із атомним номером 29, атомна (молярна) маса =63,546 г/моль. Це пластичний ковкий перехідний метал червонувато-золотистого кольору, добрий провідник тепла і електрики. Віддавна його широко використовувала людина, електродний потенціал 0,345. Фізико-хімічні властивості: густина=8,96 г/см³; молярна теплоємність=0,385 Дж/(К·моль); теплопровідність=401 Вт/(м·К); температура плавлення=1356,6 К; температура кипіння=2840 К; молярний об'єм=7,1 594,22 К· см³/моль; кристалічна ґратка-Кубічна гранецентрована.

- Кадмій (Cd) – хімічний елемент з атомним номером 48, атомна (молярна) маса =112,411 г/моль; при нормальних умовах – м'який ковкий тягучий перехідний метал сріблясто-білого кольору. Фізико-хімічні властивості: молярна маса=112,411

г/моль; температура плавлення=594,22 К; температура кипіння=1040 К; густина=8,69 г/см³; електронегативність =1,69 (за Полінгом); питома теплоємність=233 Дж/(кг·К); електропровідність 13,8 10⁶/(м·Ом); теплопровідність=96,8 Вт/(м·К).

- Цинк (Zn)— хімічний елемент з атомним номером 30, атомна маса (молярна маса)=65,39 (г/моль). Це крихкий блакитно-сірий метал. Фізико-хімічні властивості: електронегативність (за Полінгом)=1,65; електродний потенціал= -0,76 В; густина=7,133 г/см³; молярна теплоємність=25,38; Дж/(К·моль); теплопровідність=116 Вт/(м·К); температура плавлення=692,73 К; температура кипіння=1180 К; молярний об'єм=9,2 см³/моль; кристалічна ґратка – гексагональна.

- Телу́р (Te)— хімічний елемент із атомним номером 52, атомна маса (молярна маса)=127,6 (г/моль). Сріблясто-білий металоїд, схожий на олово, як елемент 16-ї групи за хімічними властивостями близький до селену та сульфуру. Використовується зазвичай у сплавах і в напівпровідниковій промисловості. Фізико-хімічні властивості: електронегативність (за Полінгом)=2,1; електродний потенціал=0; густина=6,24 г/см³; молярна теплоємність=0,201 Дж/(К·моль); теплопровідність=14,3 Вт/(м·К); температура плавлення=722 К; температура кипіння=1 263 ; молярний об'єм20,5 см³/моль; кристалічна ґратка-Гексагональна.

1.4 Електричні та оптичні властивості CdTe та ZnTe

Телурид Кадмію (CdTe)— кристалічна речовина із кристалічною ґраткою типу цинкової обманки (ZnS). Напівпровідник. Належить до групи сполук типу АІІВІ. Використання ґрунтується на напівпровідникових властивостях речовини. Телурид кадмію в монокристалічній формі використовується для створення детекторів гамма та жорсткого рентгенівського випромінювання та як ІЧ-фільтр. Тонкі плівки CdTe використовуються для виготовлення сонячних панелей. Останнім часом зростає інтерес до квантових точок на основі CdTe.

CdTe має такі властивості: молярна маса=240,01 г/моль. Густина =5,855 г/см³, агрегатний стан -тверде тіло, нерозчинний у воді, температура плавлення=1092°С, тип напівпровідника- широкозонний, ширина забороненої зони при 0 К=1,605 еВ.

Кадмій телурид за своїми фізичними характеристиками і параметрами має ряд переваг у порівнянні з елементарними напівпровідниками (Ge, Si). Наприклад:

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.

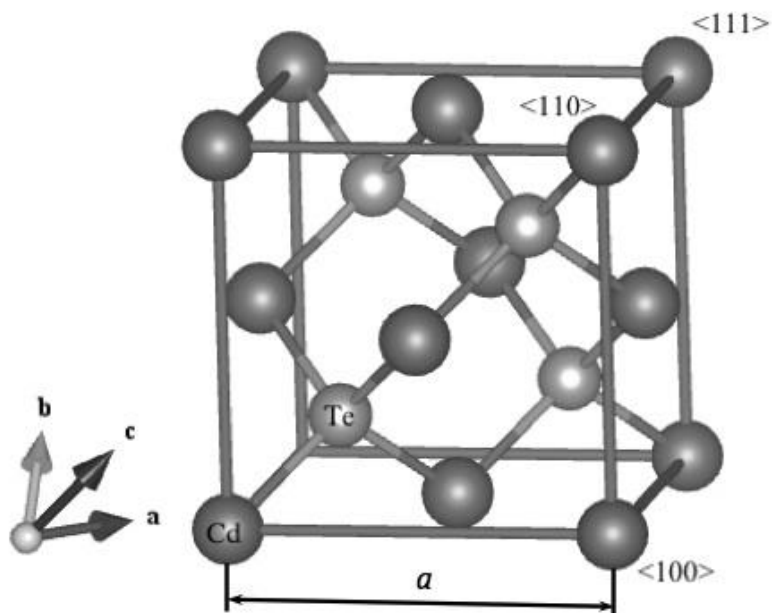


Рис.1.3. Кристалічна ґратка Телуриду Кадмію(CdTe)

Телурид цинку – бінарна сполука цинку і телуру з хімічною формулою ZnTe. Цинкова сіль телурової кислоти. При нормальних умовах являє собою тверду речовину. Напівпровідник, зазвичай з дірковим типом провідності і шириною забороненої зони 2,23-2,25 eV. Являє собою червонувато-сірий порошок, після очищення методом сублімації – рубіново-червоні кристали. Стійка при стандартних умовах кристалічна структура сполуки кубічна, з кристалічною решіткою типу цинкової обманки (сфалериту). При випаровуванні потужним світловим випромінюванням, в присутності кисню ZnTe кристалізується у вигляді гексагональних кристалів типу вюрцита. Постійна решітки кристалічної структури типу сфалериту 0,61034 нм (відстань між атомами Zn і Te - 0,263 нм)

Властивості: молярна маса=193,01 г / моль; температура плавлення= 1564 ± 2 K; температура кипіння= $1238,5$ ° C; густина= $6,34$ г / см³; теплопровідність= $0,18$ Вт / (см * град) Вт / (м · K).

Може бути отриманий різними способами:

- Синтезом з елементів. Проводиться тривалим нагріванням суміші порошків Zn і Te в запаяній кварцовою ампулі:
- Взаємодією розчинної солі цинку у водному розчині з телуководнем:
- Обмінної реакцією розчинної телуриду з розчинною сіллю цинку:
- Електролітичним методом, при цьому анод - цинковий і катод - телурової, в розчині кислоти, наприклад, сірчаної.

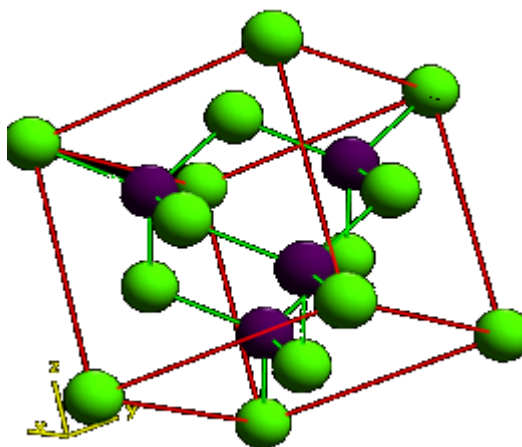


Рис.1.4. Кристалічна гратка Телуриду Цинку (CdZn)

1.5 Фізико-хімічні властивості кристалів CdZnTe

CdZnTe (CZT) є широкозонним напівпровідниковим матеріалом, що дозволяє створювати на його основі детектори рентгенівського і гамма-випромінювання з досить високою роздільною здатністю і високою швидкістю рахунку при температурах близьких до кімнатної.

Характеристики дозволяють успішно використовувати CdZnTe детектори в атомній промисловості, медицині, в космічних дослідженнях і при забезпеченні радіаційної безпеки, у багатьох інших промислових та лабораторних застосуваннях.

Телурид кадмію (CdTe) і телурид кадмію цинку (CdZnTe) розглядалися як перспективні напівпровідникові матеріали для жорсткого рентгенівського і гама виявлення. Однак, значна кількість втрати обов'язкова в цих детекторах виробляє зменшений дозвіл енергії. Ця проблема виникає через низьку рухливість і короткий термін служби отворів. Останнім часом досягнуті значні поліпшення спектральних властивостей на основі досягнень у виробництві кристалів і конструкції електродів.

За рахунок збільшення концентрації TeZn ширина забороненої зони матеріалу збільшується з 1,44 еВ (для CdTe) до 2,2 еВ (для ZnTe). При найбільш широко

використовуваному складі $x = 0,08 - 0,15$, CdZnTe має ширину забороненої зони $\sim 1,6$ еВ та проявляє високий електричний опір $\rho = (1,0 - 4,0) \times 10^{10}$ Ом $\times$ см (n-типу), що близько до теоретичного максимуму допустимої ширини забороненої зони.

Ширина забороненої зони, CdZnTe може змінюватися $E_g = 1,6 - 4,6$;

густина $= 5,81/\text{см}^3$.

1.6 Методи отримання та властивості плівок оксиду міді

Існують різні методи отримання тонких плівок. У зв'язку з мініатюризацією мікросхем, а також із застосуванням тонких плівок в різних інших областях науки і техніки, основні методи отримання вдосконалювалися, завдяки чому з'явилося безліч нових способів осадження таких плівок. Далі я спробую розглянути деякі з сучасних методів отримання тонких плівок оксидів міді, таких як реактивне магнетронного розпилення на постійному струмі (reactive d.c. magnetron sputtering), хімічне осадження з газової фази або CVD метод (chemichal vapor deposition), імпульсне лазерне осадження (pulsed laser deposition), високочастотне магнетронне розпилення (reactive r.f. magnetron sputtering), молекулярно-променева епітаксії (molecular-beam epitaxy), термічне окислення (thermal oxidation), золь-гель метод (sol-gel).

CuO (тенорит) і Cu_2O (куприт) є двома стабільними формами оксиду міді.

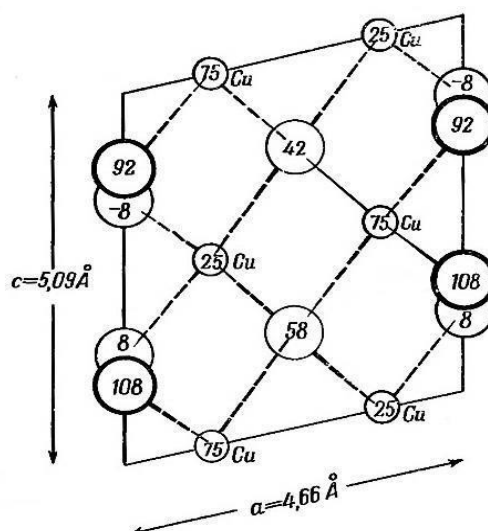


Рис.1. 5. – Структура оксиду міді (II) (CuO)

CuO має моноклінну кристалічну структуру і ширину забороненої зони в межах 1.2 - 1.9 еВ. Цей оксид металу характеризується чорним кольором, високою абсорбцією і низьким рівнем теплового емітансу.

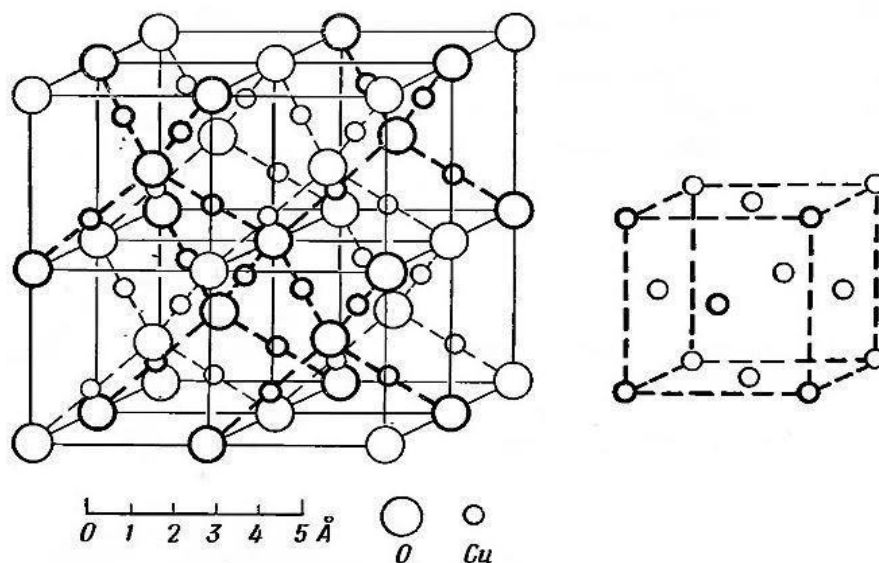


Рис.1. 6. – Структура оксиду міді (I) (Cu_2O)

Інший оксид міді, Cu_2O , має коричнево-червоний колір, має кубічну кристалічну структуру і ширину забороненої зони в межах 2 – 2.2 еВ.

Обидва ці оксиди є напівпровідниковими матеріалами і виявляють характеристики р - типу, завдяки наявності у міді вільної вакансії в кристалічній структурі.

РОЗДІЛ 2 Експериментальна частина

2.1 Методика експерименту

Тонкі плівки Cu_2O отримували методом ВЧ-магнетронного розпилення мішені CuO . Процес напилення проводили в установці УВН-70, яка для цього була обладнана магнетроном, робоча частота якого – 13,56 МГц. Для уникнення потрапляння у напилювану плівку сірки із вакуумного масла в якості високовакуумного насоса використовувався турбомолекулярний насос ТМН-500. Для виготовлення мішені використовували порошок оксиду міді II запресований у алюмінієвий стакан, внутрішній діаметр якого значно більший ніж діаметр зони ерозії (робоча зона розпилення) магнетрона для запобігання розпилення матеріалу стакана.

Для дослідження оптичних властивостей тонкі плівки Cu_2O наносили на скляні підкладки (в якості підкладок використовували покривне скло), для електричних властивостей на ситалові підкладки. Підкладки розташовували на пічці, виготовленій із нержавіючої сталі, і яка дозволяла підтримувати температури до 600°C . Температура підкладки контролювалась за допомогою ХА-термопари.

Всі плівки Cu_2O було отримано при потужності магнетрону 180 Вт. Процес напилення плівок тривав 30 та 60 хвилин.

Для виготовлення гетероструктур плівки Cu_2O наносились на свіжосколоті пластиникристалів $n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. Ці кристали були вирощені методом Бріджмена та мали питомий опір $\rho \gg 10^2 \text{ Ом}$.

2.2 Метод Бріджмена-Стокбаргера

Метод Бріджмена-Стокбаргера, або метод спрямованої кристалізації, полягає в тому, що через піч, що має нерівномірний розподіл температури по довжині, простягається ампула з матеріалом (можлива нерухома ампула і рухома піч). Ампула має загострений кінець для виключення утворення великого числа зародків. Кристалізація цим методом може здійснюватися в двох режимах в контейнері: або при переміщенні контейнера з речовиною через зону розплавлення, або при плавному зниженні температури в умовах постійного градієнта температурного поля. Ці режими реалізовані в двох варіантах: кристалізації у вертикальному і горизонтальному напрямках. При вертикальному переміщенні контейнера

монокристали можуть вирости при спонтанному зародженні або на затравку. У разі спонтанного зародження дну контейнера надають конічну форму. Тигель з розплавом переміщається в печі з високотемпературної області в низькотемпературну. В результаті цього на дні конусоподібного тигля починається кристалізація, і завдяки геометричному відбору виростає один монокристал, що має форму судини. Це не дозволяє використовувати метод Стокбаргера для кристалізації речовин, що розширюються при затвердінні (Ge, Si і т. д.). Метод простий і економічний.

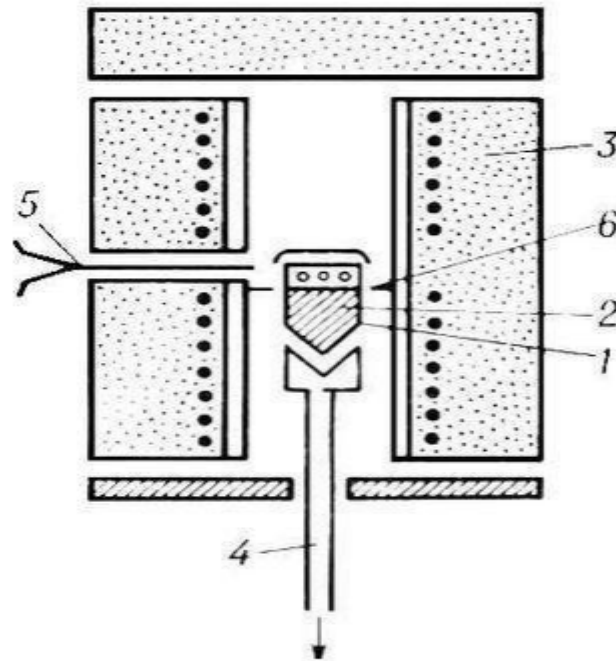


Рис.2.1.Схема апарату для вирощування монокристалів методом Стругбаргера-Бріджмена: 1- тигель з розчином, 2- кристал, 3- піч, 4- холодильник, 5- термопара, 6- діафрагма.

У напівпровідниковій мікроелектроніці для отримання монокристалічного матеріалу широко застосовується метод Бріджмена. Розвиток сучасних технологій пред'являє все більш високі вимоги до якості монокристала. Керуючи течіями в розплаві, можна істотно впливати на якість одержуваного матеріалу.

Одним з найбільш перспективних способів управління процесом кристалізації є вібраційний вплив. В останні десятиліття проводиться велика кількість експериментів з вирощування кристалів методом Бріджмена в умовах мікрогравітації. На початковому етапі метою таких досліджень було отримання матеріали зі значно поліпшеними властивостями. В даний час мікрогравітація стала засобом, що дозволяє більш глибоко вивчати фундаментальні процеси, супроводжуючі зростання монокристала.

Одним з основних вимог, висуваються технологічним процесам вирощування кристалів до термічного обладнання, є стабільність підтримки температурного поля в робочому обсязі установки. Процеси, що протікають під час росту кристала (переміщення ростового контейнера (ампули) з робочою речовиною, зміна теплофізичних властивостей робочої речовини при переході з рідкого стану в твердий, виділення прихованої теплоти кристалізації та інше, призводять до змін температурного поля в робочий об'єм. Зміни температурного поля викликають відхилення осьової швидкості зростання кристала від номінальної швидкості переміщення ростового контейнера, які можуть негативно вплинути на досконалість зростаючого кристала.

Як експериментальні, так і чисельні дослідження показують, що в процесі вирощування методом Бріджмена великий вплив на якість, вирощуваного кристала надає виникають конвективні течії, отже, керуючи ним, можна управляти тепломасопереносом в розплаві, а значить якістю вирощеного кристала.

Течії в розплаві можуть, як покращувати, так і погіршувати однорідність розподілу домішки в вирощуваному кристалі. З одного боку, течії, сприяючи перемішуванню домішки в розплаві, вони підвищують однорідність її розподілу. З іншого боку, течії в розплаві переносять домішки і здатні порушити однорідність розподілу домішки в вирощуваних кристалах, створюючи ділянки в яких є локальний надлишок або недолік домішки. У цьому сенсі течії шкідливі і їх потрібно ефективно пригнічувати. Особливо шкідливі коливальні течії в розплаві, так як при такому перебігу домішка перерозподіляється непередбачуваним чином.

З метою придушення течій слід використовувати нагрівачі (печі), які створюють стійку температурну стратифікацію в розплаві. В земних умовах такою стійкою стратифікацією є постійний вертикальний градієнт температури, спрямований вгору. На практиці існують фактори, які порушують профіль температури, створюваний нагрівачем. До таких факторів можна віднести, наприклад, наявність ампули (контейнера, заповненого вирощуваним матеріалом). Адекватний облік наявності теплообміну між матеріалом і ампулою кінцевої товщини, виготовленої з типових матеріалів, використовуваних для методу Бріджмена, показав, що осьовий градієнт температури, як правило, знижується, а радіальний може, як знижуватися, так і

підвищуватися. В системі створюється стійкий, вертикальний градієнт температури, при якому конвективні течії не повинні виникати. Однак, із-за різниці теплопровідності твердої і рідкої фаз руху нагрівача, виділення тепла при фазовому перетворенні виникає радіальний градієнт температури, який веде до появи течій.

Отже, при коректному моделюванні процесу росту кристалів необхідно брати до уваги і конвективний тепломасоперенос, і наявність ампули. Однак, можлива оптимізація дизайну печі і ампули, що дозволяє знизити осьову і радіальну сегрегації. Це є основною метою всіх досліджень, яких до теперішнього моменту існує дуже багато. У зазначених роботах велику увагу приділено тому, як течія впливає на розподіл домішки в розплаві і, отже, в кристалі, і як добре продумана конфігурація експериментальної або модельної установки, що веде до модифікації течії, може вплинути на розподіл домішки в вирощеному кристалі. Експериментальні установки з вирощування кристалів вертикальним методом Бріджмена з часом сильно змінилися під впливом рекомендацій щодо оптимізації тепломасопереносу, зроблених на основі теоретичне дослідження.

Для методу Бріджмена-Стокбаргера використовується кілька варіантів вдосконалених нагрівачів. Одна з цих печей являє собою дві трубки, які формують гарячу і холодну ізотермічні зони. Між ними знаходиться адіабатична зона. В іншому варіанті печі використовується нагрівач, що створює однорідний вертикальний градієнт температури уздовж всієї довжини ампули.

Для печі з адіабатичною зоною протягом в розплаві при вирощуванні кристалів методом Бріджмена має форму двох вихорів, розташованих один над іншим. Вихор, розташований поблизу поверхні розділу кристал/розплав, конвективним чином переносить домішка вгору вздовж осі ампули, він обумовлений різницею теплопровідностей кристала, розплаву і ампула. У верхньому вихорі рідина рухається проти годинникової стрілки (розплав рухається вгору вздовж стінки ампули), цей вихор, викликаний радіальним градієнтом температури, що виникли із-за наявності переходу між адіабатичної і гарячої зонами печі.

У разі градієнтної печі (з лінійним по всій довжині ампули градієнтом температури), формується лише один вихор, обумовлений радіальним градієнтом температури, що виникають біля викривляється фронту.

2.3 Установка по одержанню тонких плівок Cu_2O методом ВЧ магнетронного розпилення.

Ми отримували тонкі плівки Cu_2O методом ВЧ-магнетронного розпилення. При оптимальних режимах були отримані плівки $p\text{-Cu}_2\text{O}$ із шириною оптичної забороненої зони $E_g = 2,6$ eV та питомим опором $\rho = 0,5$ Ом $\times$ см.

Під магнетронним (катодним)розпиленням розуміють видалення атомів з негативно зарядженого тіла (катода) шляхом його бомбардуванням позитивно зарядженими іонами плазми

Плазма – це іонізований газ у електричному полі. Плазма в процесі катодного розпилення характеризується свіченням, колір і інтенсивність якого змінюються в залежності від типу газу, його тиску і прикладеної напруги.

Як показано на рис. 2.2, позитивно заряджені іони рухаються в напрямку катода і бомбардують його, що призводить до вибивання атомів катода. Після цього, вибиті атоми розлітаються у всі напрямки внаслідок чого починається процес осадження плівки матеріалу катода по всій поверхні вакуумної камери.

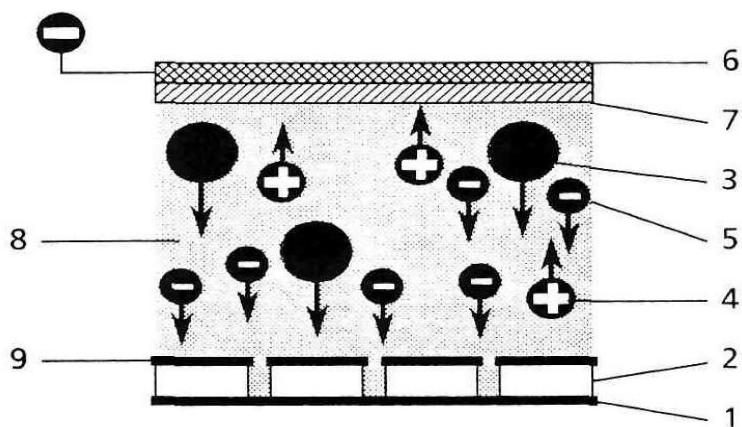


Рис.2.2. Схематичне зображення процесу катодного розпилення. 1 – утримувач підкладки, 2 – підкладки, 3 – розпилені частки, 4 – іони плазми, 5 – вторинні електрони, 6 – катод, 7 – мішень, 8 – плазма, 9 – осаджений матеріал .

Іонізація газу в вакуумній камері (або утворення плазми) спричинене електронами, які прискорюються електричним полем в напрямку від негативно зарядженого катода до позитивно зарядженої стінки вакуумної камери. На своєму шляху, ці електрони іонізують нейтральні атоми газу який заповнює вакуумну камеру. А позитивно заряджені іони прискорюються електричним полем у напрямку до негативно зарядженого катода.

Серед обов'язкових умов для забезпечення катодного розпилення можна виділити такі:

1. Вакуумна камера відкачана перед початком процесу катодного розпилення до тиску залишкових газів менше 10^{-5} мбар.
2. Інертний газ, який використовують для забезпечення необхідного тиску у вакуумній камері для процесу розпилення.
3. Катод з мішенню на основі матеріалу для розпилення, які електрично ізольовані від стінок вакуумної камери.
4. Блок живлення, яке повинно бути спроможним подавати напругу від декількох сотень до одного кіловольта при струмі у декілька ампер.
5. Підкладки, на які планується нанести тонку плівку з матеріалу мішені.

Зауважимо, що незадовільний тиск менший за атмосферний, придатний для процесу катодного розпилення. Робочий тиск, при якому відбувається катодне розпилення за нормальних умов, знаходиться в межах від 10^{-3} до 5×10^{-2} мбар. При меншому тиску неможливо створити стабільну плазму. При більшому тиску відбувається інтенсивна взаємодія вибитих атомів мішені з іонами плазми, що унеможлиблює ефективний процес напилення.

Як відзначалося раніше, видалення атомів матеріалу мішені відбувається внаслідок бомбардування позитивно зарядженими іонами газу. Якщо використовувати в якості робочого газу для катодного розпилення кисень, то відбуватиметься інтенсивний процес окислення вибитих атомів. Тобто внаслідок чистого металу на підкладки буде осідати оксид металу. Тому необхідно використовувати інертні гази, як правило, аргон, через його велику атомну масу.

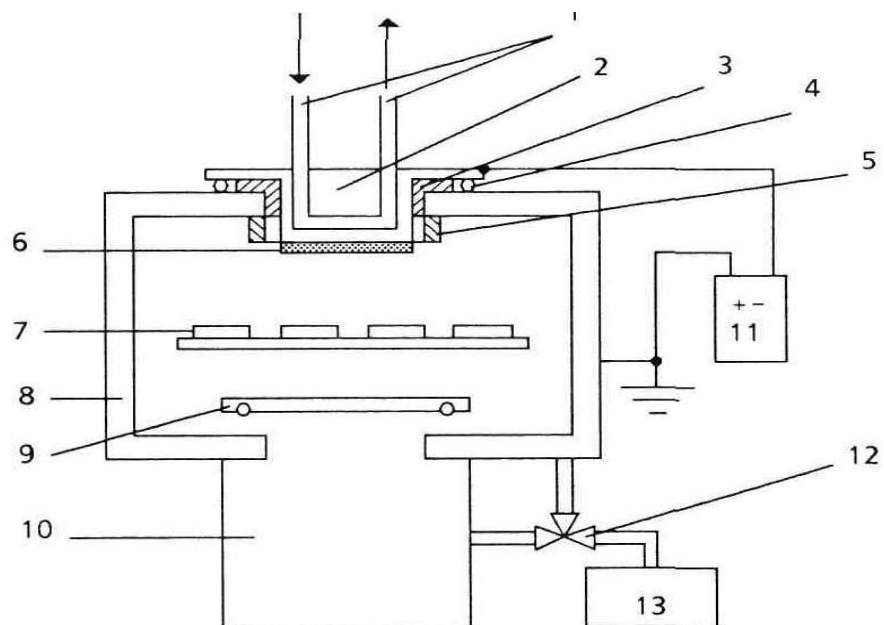


Рис.2.3. Вакуумна система: 1 – охолодження, 2 – катод, 3 – ізолятор, 4 – вакуумна прокладка, 5 – екрани, 6 – мішень, 7 – підкладки, 8 – вакуумна камера, 9 – клапан високого вакууму, 10 – дифузійний або турбовакуумний насос, 11 – блок живлення, 12 – клапан, 13 – форвакуумний насос

РОЗДІЛ 3. Результати дослідження та їх обговорення

3.1 Оптичні властивості тонких плівок Cu_2O

Дослідження оптичних коефіцієнтів проводили за допомогою спектрофотометра СФ2000 зі спектральним діапазоном досліджень від 0,2 до 1,1 мкм.

При визначенні оптичних коефіцієнтів використовували метод, що оснований на незалежному вимірюванні коефіцієнта відбивання та пропускання[6]. Можливість використання цього методу для дослідження оптичних коефіцієнтів тонких плівок напівпровідників нанесених на прозорі підкладки обґрунтована в [7].

Таким чином, для визначення коефіцієнта поглинання (α) необхідно було провести вимірювання коефіцієнтів пропускання (Т) і відбивання (R). Вимірювання коефіцієнта відбивання проводили за допомогою спектрометра СФ-2000 та приставки для вимірювання відбивання Pike для якої в якості джерела світла використовувалась галогенна лампа, що дозволило дослідити спектри відбивання в інтервалі довжин хвиль $\lambda = 0,4 - 1,1$ мкм.). Спектри пропускання тонких плівок представлені на рис.3.1.

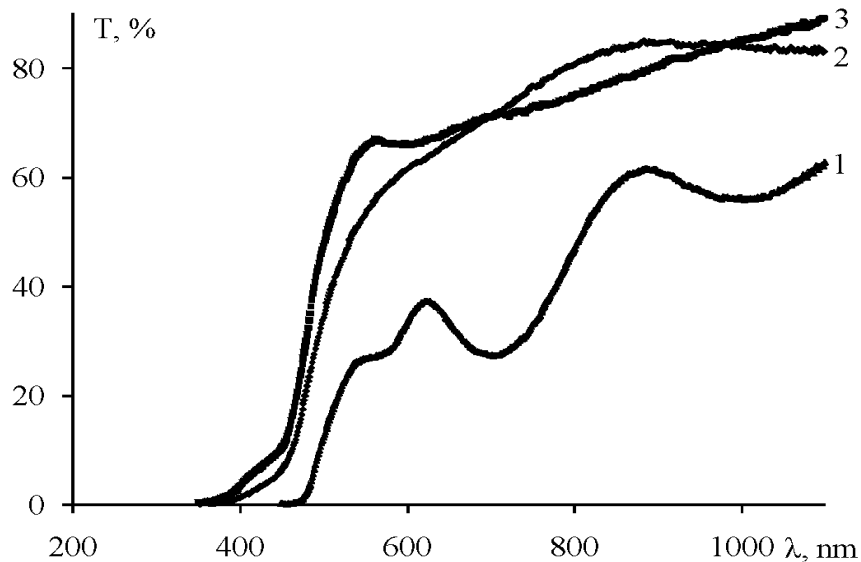


Рис.3. 1 – Спектри пропускання тонких плівок Cu_2O : 1 - $t = 60$ хв, $T_{\text{під}} = 315$ °C; 2- $t = 30$ хв, $T_{\text{під}} = 270$ °C; 3 - $t = 30$ хв, $T_{\text{під}} = 375$ °C

В такому випадку коефіцієнт поглинання можна вираховувати за формулою:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left[\frac{(1-R)^2}{2T} + \sqrt{\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2} \right]$$

На залежностях $\alpha^2 = f(h\nu)$ для отриманих плівок Cu_2O (рис.3.2) спостерігались

прямолінійні ділянки, що свідчить про те що Cu_2O відноситься до прямозонних напівпровідників та дозволило визначити ширину оптичної забороненої зони для кожного зразка.

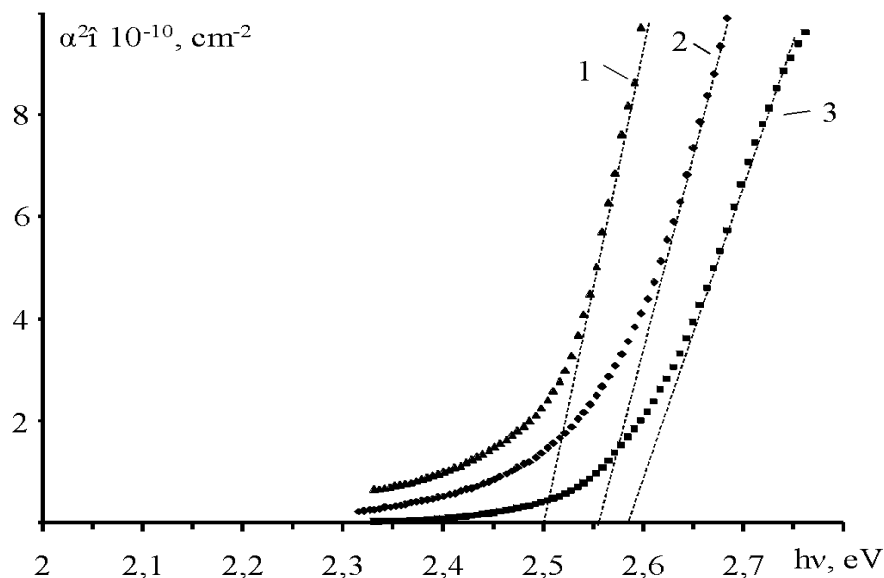


Рис.3. 2 – Спектри поглинання тонких плівок Cu_2O : 1 - $t = 60$ хв, $T_{\text{під}} = 315$ °C; 2- $t = 30$ хв, $T_{\text{під}} = 270$ °C; 3 - $t = 30$ хв, $T_{\text{під}} = 375$ °C

Електричний опір отриманих плівок досліджувався чотиризондовим методом на постійному струмі. Товщину вимірювали за допомогою мікроінтерферометра Ліннека МІІІ-4.

Товщини плівок (d), оптичні ширини заборонених зон (E_g), питомий опір (ρ) плівок Cu_2O , які були отримані при різних температурах підкладки ($T_{\text{під}}$) та тривалості процесу напылення (t) приведені в таблиці 1.

Висновок, що отримані плівки саме Cu_2O , а не CuO дозволило зробити те, що оптична ширина забороненої зони отриманих плівок сягала 2,5-2,58 еВ, що притаманно Cu_2O , в той час як ширина забороненої зони для CuO – 1,4-1,7 еВ.

Таблиця 1 – Параметри тонких плівок Cu_2O

	t , хв	$T_{\text{під}}$, °C	E_g , еВ	d , мкм	ρ , Ом×см
1	60	315	2,5	0,12	90
2	30	270	2,56	0,06	50
3	30	375	2,58	0,06	0,5

Така ситуація пояснюється тим, що при розпиленні, оксид міді II розкладається в плазмі і частина кисню відкачується вакуумними насосами. Причому, оскільки температура підкладки має сильний вплив на параметри плівки, то ймовірно за все при ВЧ-магнетронному розпиленні CuO , в результаті осаджуються плівки твердих розчинів CuO_x ($0,5 \leq x \leq 1$).

Підвищення температури підкладки призводить до зміщення стехіометричного складу плівки в бік Cu_2O ($x=0,5$), що і викликає зростання ширини забороненої зони плівок. Зменшення вмісту кисню в плівці призводить до зростання концентрації вакансій в аніонній підгратці, що збільшує концентрацію акцепторів, а значить і електропровідність, що підтверджує таблиця 1. Великий (порівняно з іншими зразками) опір зразка 1 пов'язаний, швидше за все, із більшою тривалістю процесу напилення, що може сприяти заліковуванню вакансій в аніонній підгратці, киснем що присутній в плазмі в результаті розпаду CuO під час напилення.

3.2 Електричні властивості гетероструктури $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

ВАХ гетероструктури $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ (рис.3.3) вимірювались за допомогою апаратно-програмного комплексу на базі цифрового мультиметра Agilent 34410A та джерела-живлення Siglent SPD 3303 X, які керувались персональним комп'ютером за допомогою програмного забезпечення створеного у середовищі LabView.

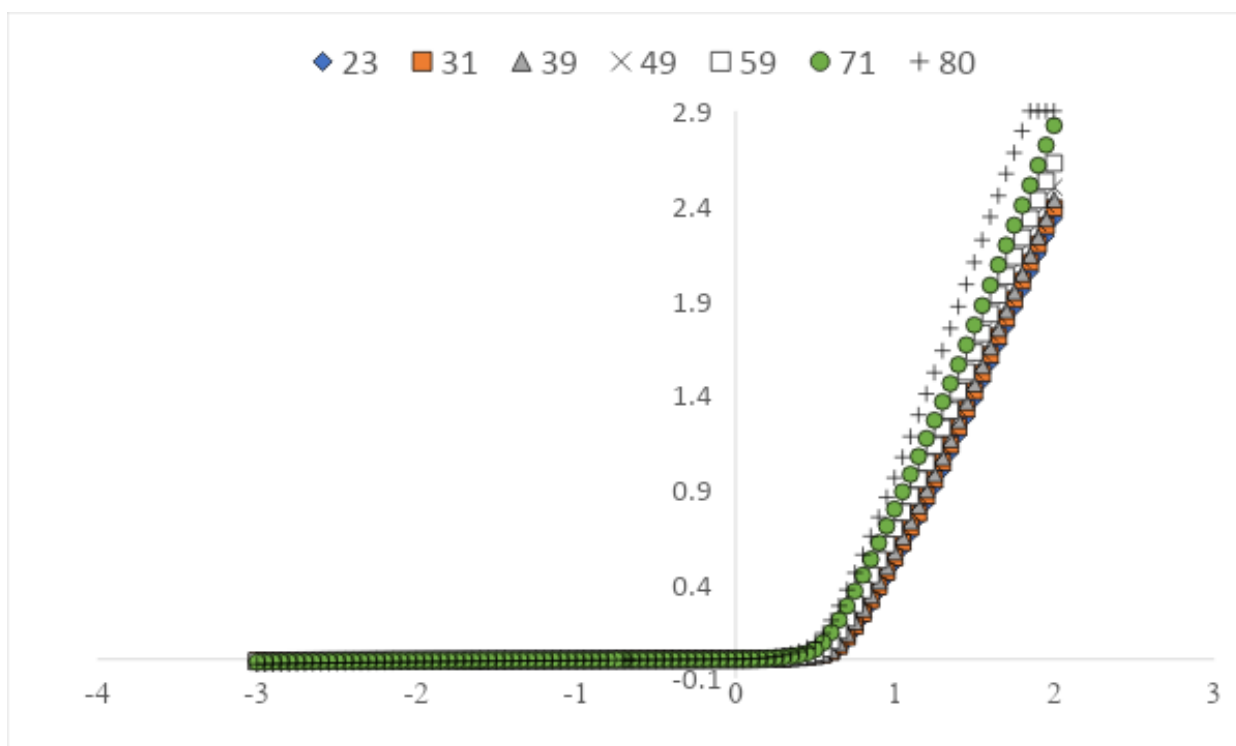


Рис. 3.3 – Вольт-амперні характеристики p-Cu₂O/n-Cd_{1-x}Zn_xTe при різних температурах.

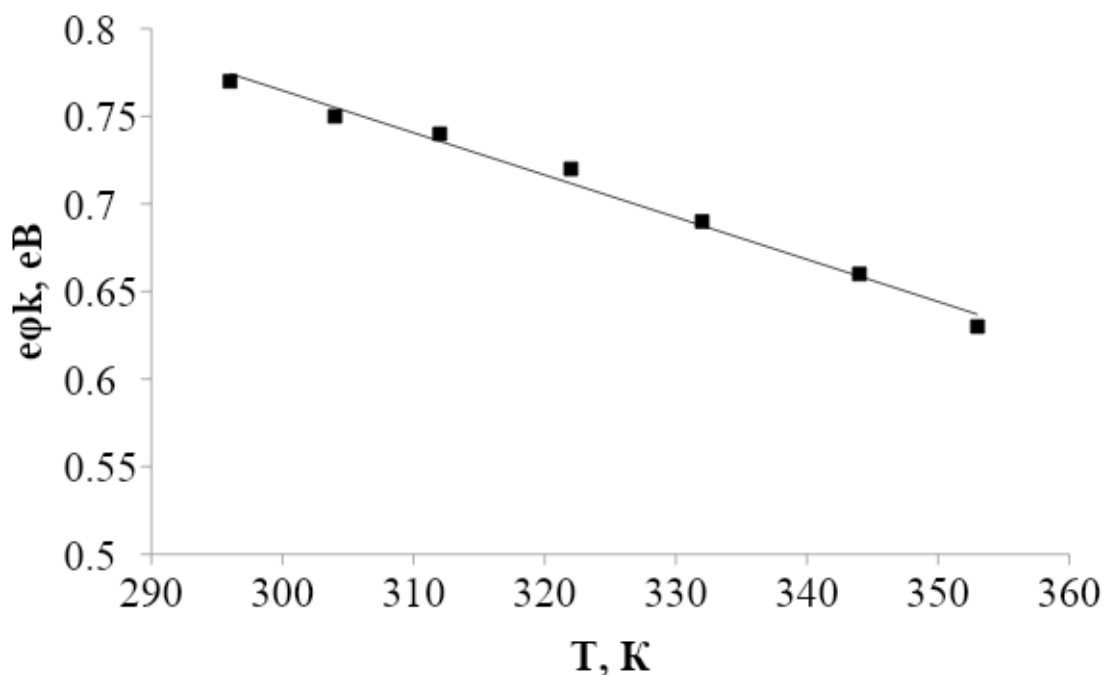


Рис. 3.4 Температурні залежності висоти потенціального бар'єру.

На основі одержаних вольт-амперних характеристик екстраполяцією прямолінійних ділянок прямих гілок було визначено значення висоти потенціального бар'єру та побудовано її залежність від температури (рис.3.4.) з якої визначено $\phi_0(0\text{ K})=1,49\text{ eV}$ та коефіцієнт $B_\phi = 2,41 \times 10^{-3} \text{ eV} \times \text{K}^{-1}$. З ВАХ визначено коефіцієнт випрямлення який при $|U|=2\text{ V}$ та $T=296\text{ K}$ має значення $RR \sim 10^3$ та зменшується із ростом температури, що пов'язано із зменшенням з температурою опору базової області (Cd_{1-x}Zn_xTe), (що підтверджує температурна залежність послідовного опору – рис.3.5), і як наслідок висоти потенціального бар'єру.

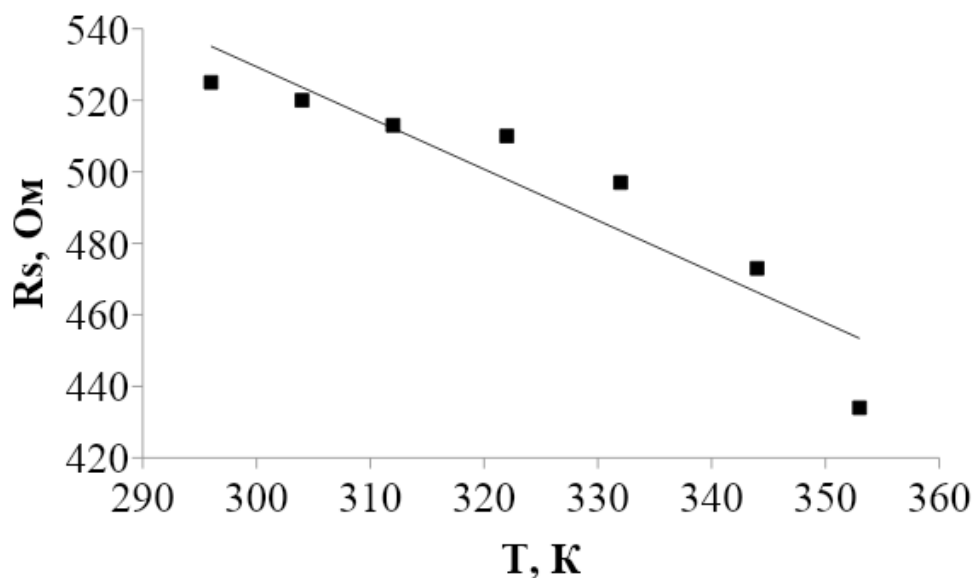


Рис. 3.5. Температурна залежність послідовного опору

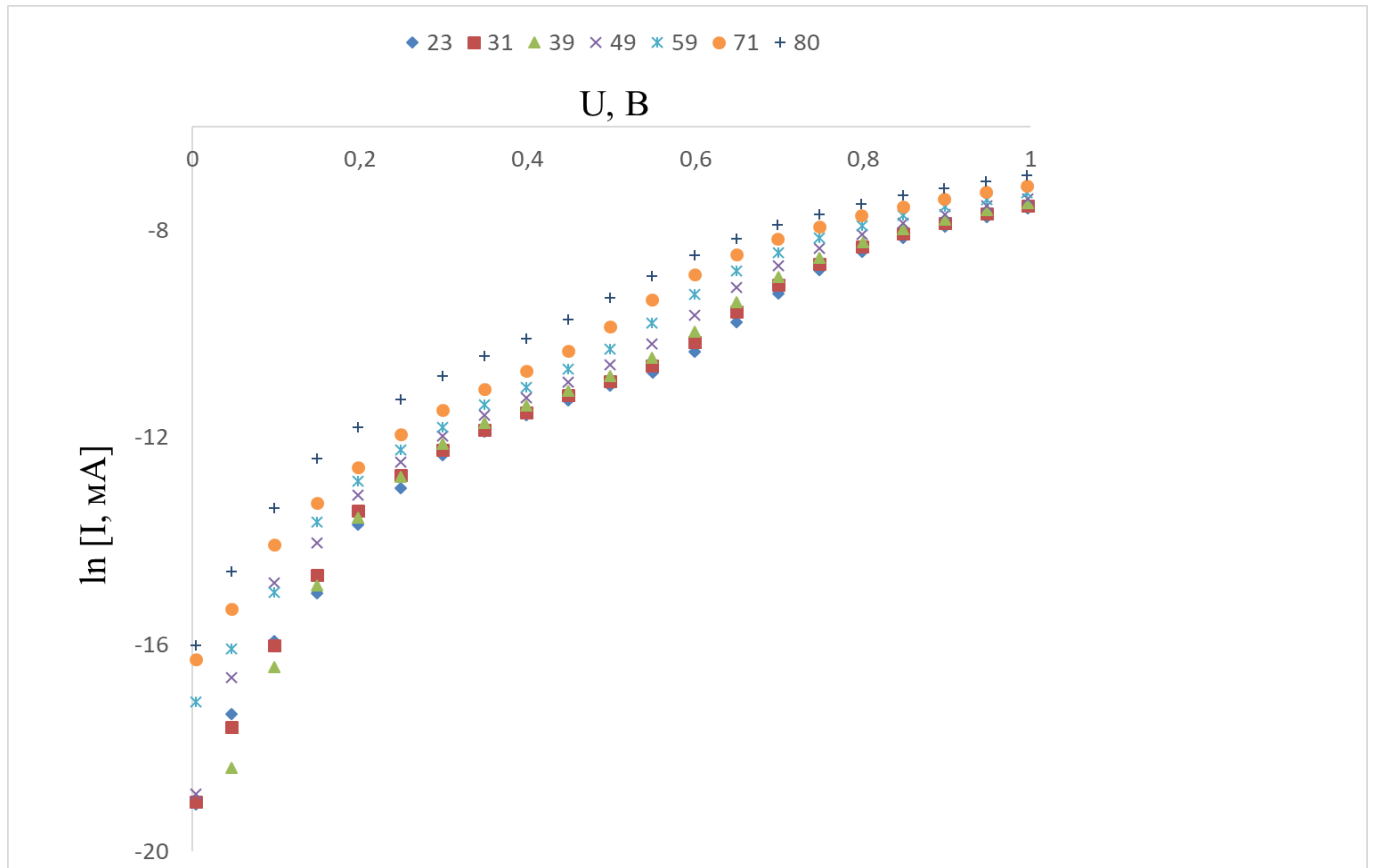


Рис. 3.6. Прямі гілки ВАХ р-Cu₂O/n-Cd_{1-x}Zn_xTe в стані термодинамічної рівноваги ($T = 300$ K)

Як видно з рис.3.6. на залежностях ВАХ побудованих у напівлогарифмічних координатах спостерігаються прямолінійні ділянки при малих ($0\text{В} < U < 0,2\text{В}$), середніх ($0,2\text{ В} < U < 0,5\text{В}$) і великих ($0,5\text{В} < U < 0,7\text{В}$) зміщеннях за допомогою яких визначено коефіцієнт неідеальності ВАХ для кожної ділянки при кожній температурі. Отримані значення приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Показника неідеальності ВАХ для структури р-Cu₂O/n-Cd_{1-x}Zn_xTe

Т, К	296	304	312	322	332	344	353
малі зміщення ($0 < U < 0,2\text{ В}$)	1,41	1,32	1,03	1,21	1,59	1,61	1,32
середні зміщення ($0,2\text{ В} < U < 0,5\text{ В}$)	6,81	6,24	5,99	5,25	4,9	4,43	3,95
великі зміщення ($0,5\text{ В} < U < 0,7\text{ В}$)	3,48	3,43	3,5	3,59	3,5	3,5	3,95

Аналіз отриманих результатів (таблиця 2) показав, що при малих зміщеннях переважає надбар'єрна емісія, при середніх – тунелювання, а при великих

–генераційно-рекомбінаційний механізм струмопереносу за участю поверхневих станів на металургійній межі поділу. При підвищенні температури генераційно-рекомбінаційний механізм струмопереносу поступово зникає і переходить в тунелювання, що може бути пов'язане із ростом концентрації електронів з температурою у базовій області гетеропереходу ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$) та зменшенням висоти потенціального бар'єру.

Аналіз струмопереносу при зворотних зміщеннях показав що в діапазоні ($-1,2 \text{ В} < U < -0,2 \text{ В}$) зворотній струм описується виразом:

$$I_{rev}^t \approx a_0 \exp\left(\frac{b_0}{\sqrt{\phi_0(T) - eV}}\right)$$

тобто залежності $\ln I = f(\phi_0 - qU)^{1/2}$ є прямими лініями, що вказує на те що при вказаних напругах домінує тунельний механізм струмопереносу. При напругах ($U < -1,2 \text{ В}$) спостерігається емісія Френкеля-Пула, про що свідчать прямолінійні ділянки на залежностях $\ln I = f(U^{1/2})$ (рис.3.8). Суть процесів, що відбуваються у цьому випадку, полягає в полегшеному електричним полем термічному збудженні захоплених поверхневими пастками носіїв заряду. Наявність досить сильного електричного поля в області гетеропереходу підтверджується високим значенням контактної різниці потенціалів (0,77 В при 296 К).



Рис.3. 7. – Зворотні гілки ВАХ p-Cu₂O/n-Cd_{1-x}Zn_xTe у випадку тунельного механізму струмопереносу та емісії Френкеля-Пула на вставці ($T = 300$ K).

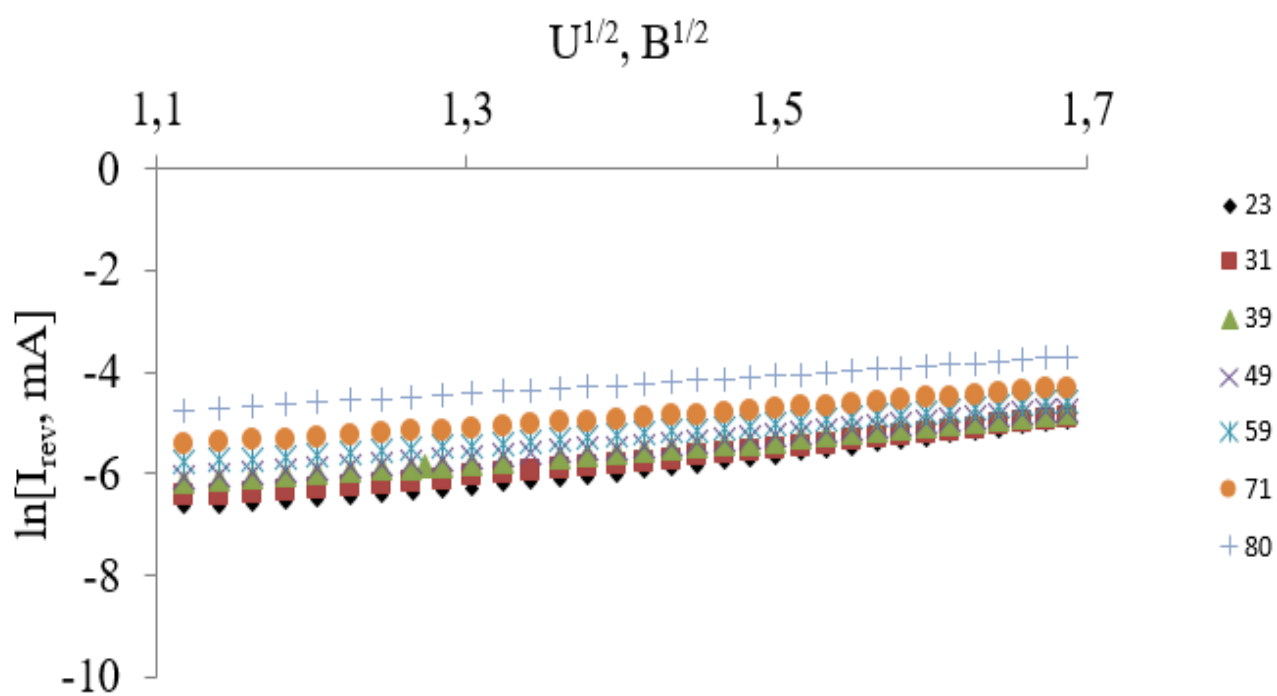


Рис.3.8. Залежність $\ln I = f(U^{1/2})$

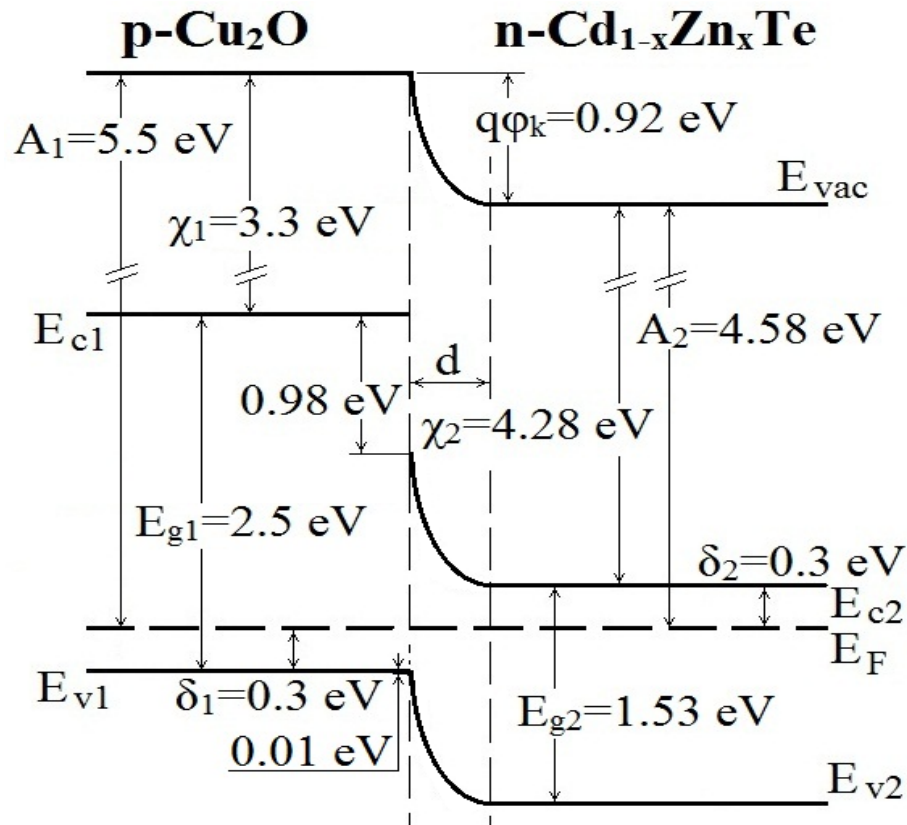


Рис.3. 9 – Енергетична діаграма гетероструктури p-Cu₂O/n-Cd_{1-x}Zn_xTe в стані термодинамічної рівноваги ($T = 300 \text{ K}$)

Енергетична діаграма анізотипних гетероструктур p-Cu₂O/n-Cd_{1-x}Zn_xTe у відповідності з моделлю Андерсона, без врахування поверхневих електричних станів і діелектричного шару, була побудована на основі значень енергетичних параметрів напівпровідників (рис.3. 9) [13, 19, 22].

Значення необхідні для побудови енергетичної діаграми для Cd_{1-x}Zn_xTe були визначені експериментальним шляхом, спорідненість до електрона $\chi = 4,28 \text{ eV}$ взята як для телуриду кадмію, для p- Cu₂O визначені із кінетичних і оптичних досліджень (спорідненість до електрона для $\chi_{\text{Cu}_2\text{O}} = 3,3 \text{ eV}$).

ВИСНОВКИ

1. Використовуючи різні режими напилення, тобто змінюючи час напилення та температуру підкладки, за допомогою високочастотного магнетронного розпилення було отримано плівки Cu_2O товщиною 60 та 120 нм.
2. Із оптичних досліджень встановлена наявність прямих дозволених оптичних переходів та визначено оптичну ширину забороненої зони плівок Cu_2O (2,5-2,58 eV). Дослідження електричного опору отриманих плівок показали, що він сягає значень 0,5 - 90 Ом×см в залежності від режиму напилення тонких плівок.
3. Отримано гетероструктуру $p\text{-Cu}_2\text{O}/n\text{-Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ із ВАХ якої було визначено $\varphi_0(0\text{ K})=1,49\text{ eV}$ та коефіцієнт $B_\varphi = 2,41 \times 10^{-3} \text{ eV} \times \text{K}^{-1}$, коефіцієнт випрямлення $RR \sim 10^3$ ($|U|=2\text{ V}$, $T=296\text{ K}$). Із залежностей ВАХ побудованих у напівлогарифмічних координатах визначено коефіцієнт неідеальності ВАХ та встановлено домінуючі механізми струмопереносу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. J.-H. Guo, J. E. Cotter, *Prog. Photovoltaics* **15**, 211 (2007).
2. W. Wang, M.T. Winkler, O. Gunawan, T. Gokmen, T.K. Todorov, Y. Zhu, D.B. Mitzi, *Advanced Energy Materials* **4**, 1 (2014).
3. H. Katagiri, K. Jimbo, W.S. Maw, K. Oishi, M. Yamazaki, H. Araki, A. Takeuchi, *Thin Solid Films* **517**, 2455 (2009).
4. T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata *Journal of Semiconductors* **37** 1674 (2016)
5. X. Liangbin, H. Sheng, Y. Xi, Q. Mingqiang, C. Zhenghua, Y. Ying, *Electrochimica Acta* **56**, 2735 (2011).
6. I.P. Koziarskyi, E.V. Maistruk, D.P. Koziarskyi, P.D. Maryanchuk, *Inorg Mater* **50**, 447 (2014).
7. I.P. Koziarskyi, S.L. Abashin, E.V. Maistruk, P.D. Maryanchuk, D.P. Koziarskyi, Y.A. Yatsina, *J. Surf. Investig. - X – Ra*, **9**, 415 (2015).
8. Ю.И. Уханов, *Оптические свойства полупроводников* (М.: Наука: 1977).
9. E.V. Maistruk, P.D. Maryanchuk, M.N. Solovan, F. Pinna, E. Tresso *Optics and Spectroscopy* **123** 38 (2017)
10. I.P. Koziarskyi, E.V. Maistruk, D.P. Koziarskyi, P.D. Maryanchuk, *J. Nano-Electron. Phys.* **10** No1, 01028 (2018).
11. S.M. Sze, K.N. Kwok *Physics of semiconductors devices* (Wiley: 2007)
12. A. Luque, S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons: 2011).
13. J.J. Kennedy, P.M. Amirtharaj, P.R. Boyd, S.B. Qadri, R.C. Dobbyn, G.G. Long, *J. Cryst. Growth* **86**, 93 (1988).
14. K. Guergouri, R. Triboulet, A. Tromson-Carli, Y. Marfaing, *J. Cryst. Growth* **86**, 61 (1988).
15. D.J. Olego, J.P. Faurie, S. Sivananthan, P.M. Raccach, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 1172 (1985).
16. S. Ishizuka, T. Maruyama, K. Akimoto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, L786 (2000),
Thin-Film Deposition of Cu₂O by Reactive Radio-Frequency Magnetron Sputtering.
17. X. Mathew, N.R. Mathews, P.J. Sebastian, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **70**, 277 (2001)

18. J. Franc, P. Hlídaek, P. Moravec, E. Belas, P. Höschl, L. Turjanska, R. Varghová, *Semicond. Sci. Tech.* **15**, 561 (2000)
19. K. Bergum, H.N. Riise, S. Gorantla, P.F. Lindberg, I.J.T. Jensen, A.E. Gunnæs, A. Galeckas, S. Diplas, B.G. Svensson, E. Monakhov, *J. Phys.: Condens. Matter* **30**, 075702 (2018).
20. H. Zhu, J. Zhang, C. Li, F. Pan, T. Wang, B. Huang, *Thin Solid Films* **517**, 5700 (2009).

Cu₂O thin films deposited by reactive direct current magnetron sputtering

ДОДАТОК

Техніка безпеки і охорона навколишнього середовища

1. Робота з електровимірювальними приладами та високою напругою

Згідно норм до встановлення та монтажу електровимірювальних установок необхідно дотримуватись таких правил:

1. Згідно із правил безпеки та норм встановлення електрообладнання необхідна наявність заземлюючих пристроїв, та надійний монтаж до них металевих частин та корпусів електроустановок, які при порушенні цілісності ізоляцію можуть проводити електричний струм. Заземлення встановлюється:

1) Якщо напруга рівна 500В або вище при постійному чи змінному струмі,

2) Якщо напруга рівна 36В і вище змінного струму і 100В постійного в місцях підвищеної небезпеки,

3) при будь якій напрузі та струмах, якщо приміщення вибухонебезпечне.

2. Вимикачі, магнітні пускачі, регулюючі пристрої і т. п. повинні мати надпис та маркування, які вказують до якого пристрою відноситься.

3. Комутаційні прилади повинні бути інформативно описані про положення «включено і виключено».

4. Лабораторія повинна бути забезпечена первинними інструментами вогнегасіння – ящик з піском, вогнегасник, брезент або шерстяна ковдра.

5. Ізоляціє проводів мусить відповідати усім стандартам якості.

6. По завершенню роботи потрібно перевірити крани водопостачання, вимкнути всі рубильники, привести до ладу робоче місце та вимкнути електроенергію.

Техніка безпеки при монтажі та експлуатації електроустаткування.

Електропристрої, що стосуються заходів безпеки підрозділяються на установки з робочою напругою до 1 кВ включно і вище 1 кВ.

Значною мірою безпека обслуговування електрообладнання залежить від умов середовища приміщення, в якому воно встановлене, бо ці умови впливають на стан ізоляції і опір шкіри людини. Волога, їдкі пари або газы, струмопровідний пил і висока температура знижують опір ізоляції і руйнують її. Крім того, шкіра людини під впливом вологи і високої температури стає провідною, що зменшує опір тіла людини і підвищує небезпеку ураження електричним струмом.

Струмопровідна підлога (металева, цегляна, бетонна), на якій стоїть людина, різко зменшує опір його кола і підвищує небезпеку дотику до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою. Провідний пил осідає на проводах і утворює провідне коло, внаслідок чого можливі замикання на землю і між фазами. Їдкі пари або газы (хімічно активне середовище) руйнують ізоляцію і зменшують її опір.

Таким чином, ознаками підвищеної небезпеки є:

1. волога (відносна вологість повітря вище 75%) або наявність струмопровідного пилу;
- 2) струмопровідні підлоги;
- 3) підвищена температура повітря (більше +35 °C);
- 4) можливість одночасного дотику людини до заземлених корпусів обладнання і до частин електрообладнання, що перебуває під напругою.

Ознакою особливої небезпеки являється наявність особливої вологості (відносна вологість повітря близька до 100 %) і хімічно активне середовище.

За ступенем небезпеки ураження людей електричним струмом приміщення підрозділяють на такі класи: без підвищеної небезпеки (відсутні ознаки як підвищеної, так і особливої небезпеки), з підвищеною небезпекою (присутня лише одна ознака підвищеної небезпеки) і особливо небезпечні приміщення (наявність хоча б однієї ознаки особливої небезпеки або одночасно двох чи більше ознак підвищеної небезпеки).

Усі роботи на електрообладнанні ведуться обслуговуючим персоналом не молодшим 18 років, кваліфікація якого з техніки безпеки підрозділяється на п'ять груп.

До I групи відносяться особи, пов'язані з обслуговуванням електроустановок, але які не мають електротехнічних знань, чіткого уявлення про небезпеку електричного струму і заходах безпеки при роботах з електроустановками, персонал, що не пройшов перевірки знань правил ТБ (різноробочі, прибиральники, будівельні робітники, учні електромонтерів тощо).

До II групи відносяться особи, які мають елементарні знання щодо електроустановок, чітке уявлення про небезпеку електричного струму і наближення до струмоведучих частин, знання основних застережних заходів при роботі з електроустановками, знання правил надання першої допомоги і вміння практично надати першу допомогу потерпілому (прийоми штучного дихання тощо). Друга кваліфікаційна група надається мотористам і прибиральникам електроустановок напругою вище 1 кВ, електромонтерам, електрослюсарям, зв'язківцям, практикантам навчальних закладів, особам неелектротехнічних спеціальностей, що постійно працюють з електроустановками.

До III групи відносяться особи, що мають елементарні знання з електротехніки, ознайомлення з улаштуванням і обслуговуванням електроустановок, чітке уявлення про небезпеку під час роботи з електроустановкою, знання загальних правил ТБ і допуску до робіт з електроустановками, знання правил надання першої допомоги і вміння практично надати першу допомогу потерпілому. Третя кваліфікаційна група надається електромонтерам, електрослюсарям, оперативному персоналу електростанцій і підстанцій, починаючим працювати інженерам і технікам, практикантам інститутів і технікумів.

До IV групи відносяться особи, що мають знання з електротехніки в об'ємі технікуму, повне уявлення про небезпеку під час роботи, знання правил ТБ, користування і випробування захисних засобів, що застосовуються в електроустановках, надання першої допомоги і вміння практично надати першу допомогу потерпілому, знання, які елементи електроустановок мають бути відімкнені для виконання роботи і вміння перевірити виконання необхідних

заходів з безпеки. Четверта кваліфікаційна група надається також починаючим працювати інженерам і технікам, електромонтерам, електрослюсарям, оперативному персоналу електростанцій і підстанцій.

До V групи відносяться особи, які знають схеми і обладнання своєї ділянки, правила ТБ, використання і випробування захисних засобів, що застосовуються в електроустановках, уміють організувати безпечне виконання робіт, навчають персонал інших груп правил ТБ і надання першої допомоги. П'ята кваліфікаційна група надається інженерам, технікам, майстрам, електромонтерам, електрослюсарям.

Придатність до обслуговування електроустановок з точки зору здоров'я визначається за допомогою медичних оглядів під час прийняття на роботу і періодичних, які проводяться не рідше одного разу на два роки. Результати медичного огляду і послідуєчих повторних оглядів заносять в особові картки.

При вступі на роботу або переводі на іншу роботу адміністрація зобов'язана провести вступний інструктаж, ознайомивши людей, що поступають на роботу, з безпечними прийомами роботи, з правилами внутрішнього розпорядку, правилами ТБ, промислової санітарії і протипожежної охорони. Крім вступного інструктажу, повинен бути проведений інструктаж безпосередньо на робочому місці.

2. Пожежна безпека

Причинами пожеж на виробництві частіше всього є недбале користування електроприладами та нехтування правилами пожежної безпеки.

Основні протипожежні заходи:

1. Швидка евакуація персоналу під час пожежі.
2. На стадії проектування корпусів необхідно створити всі умови для швидкої евакуації персоналу, та забезпечити протипожежними перегородками, які не дадуть вогню поширитись на всю будівлю.
3. Для гасіння пожеж доцільно використовувати такі засоби: водяна пара, водні розчини солей, інертні та негорючі гази, хімічна і

повітряно-механічна піна. Для ліквідації не значних вогнищ доцільно використовувати азбестові килимки, сухий пісок та протипожежний інвентар.

4. Гасіння електроустановок, які знаходяться під напругою, проводиться з допомогою сухих вогнегасник порошків.

3. Основні заходи при роботі з хімічними речовинами

Серед речовин, що застосовуються при промивці підкладок, підготовці мішеней для електронно – променевого випаровування та магнетронного розпилення часто зустрічаються отруйні та небезпечні хімікати. Тому необхідно дотримуватися основних правил при роботі з хімічними речовинами:

1. При роботі з кислотою і лугом потрібно одягти спецодяг, захисні окуляри і гумові рукавиці. Поряд повинна знаходитись посудина з нейтралізуючою речовиною.

2. Заборонено користуватися реактивами які не мають етикеток з чітким написом.

3. Не допускати розливу речовин, які легко загораються. Речовину, що розлилася негайно зібрати.

4. При процесах, які супроводжуються виділенням токсичного газу, а також при роботі з Te, Hg, Se, S необхідно працювати в окремій кімнаті з витяжною шафою.