

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича
Навчально-науковий інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук
Кафедра електроніки і енергетики

"Дослідження властивостей гетероструктури
ІТО/Fe₂O₃/n-CdTe"

Виконав:

студент 4 курсу, 432 групи
спеціальності 153 – “Мікро- та
наносистемна техніка”

Касс Едгар Андрійович

Керівник:

проф. Майструк Е. В.

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № ____

Від “ ____ ” _____ 2023 р.

зав. кафедри _____ проф. Майструк Е. В.

Анотація

Кваліфікаційну бакалаврську роботу присвячено дослідженню електричних властивостей гетероструктури ІТО/Fe₂O₃/n-CdTe, створеної послідовним нанесенням за підкладку зі свіжосколотого n-CdTe плівок Fe₂O₃ та ІТО методами спреї-піролізного осадження та магнетронного розпилення на постійному струмі відповідно.

У першому розділі подані теоретичні дані про субмікронні технології, гетероструктури та утворені на їх основі різні типи гетеропереходів, методи нанесення тонких плівок.

У другому розділі розглядаються експериментальні дані та оснований на них аналіз електричних властивостей гетероструктури ІТО/Fe₂O₃/n-CdTe, дослідження механізмів струмопереносу, еквівалентну схему гетероструктури та її енергетичну діаграму.

Третій розділ містить висновки про властивості одержаної гетероструктури.

Вступ

Субмікронні технології - це галузь науки і техніки, яка займається створенням і використанням структур і пристроїв із розмірами від кількох до кількох сотень нанометрів. Вона є просунутою формою нанотехнологій і пов'язана з маніпулюванням і контролем матеріалів і пристроїв на атомному і молекулярному рівні.

Субмікронні технології широко використовуються в різних галузях, включно з електронікою, оптикою, фотонікою, мікромеханікою і біомедициною. Субмікронна технологія покращує електричні, оптичні, механічні та хімічні властивості і дає змогу створювати пристрої з вищою щільністю інтеграції та функціональністю.

У секторі електроніки субмікронна технологія дає змогу створювати мікрочипи з меншими розмірами та вищою продуктивністю. Це призводить до створення комп'ютерів, смартфонів та інших електронних пристроїв із вищою продуктивністю та енергоефективністю.

В оптиці та фотоніці субмікронні структури використовуються для створення пристроїв, що працюють зі світлом на нанорівні. Вони можуть поліпшити оптичні комунікації та створити мікроелементи для лазерів, фільтрів і датчиків.

У мікромеханіці субмікронні технології дають змогу реалізувати мікроелектромеханічні системи (МЕМС), які об'єднують електроніку та механіку на мікроскопічному рівні. Пристрої МЕМС широко використовують в акселерометрах, гіроскопах і мікропроекторах. Пристрої МЕМС широко використовуються в акселерометрах, гіроскопах, мікропроекторах тощо.

У біофармацевтиці субмікронні технології дають змогу виробляти наночастинки, наносенсори та інші наноматеріали, які можуть бути використані для доставки ліків, діагностики захворювань і виявлення ракових клітин.

Субмікронні технології є важливою галуззю досліджень і розробок, і їхнє застосування й надалі розширюватиметься, відкриваючи нові можливості в різних галузях і просуваючи наше життя і технології.

Одним з основних напрямків розвитку наноелектроніки є структури зі зниженою розмірністю.

Завдяки своїм геометричним розмірам такі структури часто демонструють унікальні механічні, електричні та оптичні властивості, які не спостерігаються у звичайних структурах. Наприклад, вуглецеві нанотрубки мають видатні механічні властивості завдяки своїй унікальній циліндричній формі, а фотонні кристали демонструють унікальні оптичні властивості завдяки своїй періодичній та геометрично обмеженій структурі.

Проектування геометрично обмежених структур вимагає ретельного врахування властивостей і обмежень самих матеріалів і процесу виробництва. Для оптимізації кінцевої структури і характеристик цих конструкцій можна використовувати передові методи комп'ютерного моделювання та імітаційного моделювання. Крім того, розвиток нових технологій виробництва, таких як 3D-друк і нанолітографія, уможливив створення складної геометрії з високим ступенем точності та контролю.

Одним з потенційних застосувань геометрично обмежених конструкцій є розробка легких, високоміцних матеріалів. Контролюючи геометрію конструкцій, можна збільшити міцність і зменшити вагу, що робить їх привабливим варіантом для різноманітних інженерних та архітектурних застосувань. Інші потенційні застосування включають розробку вдосконалених сенсорів, пристроїв зберігання даних високої щільності та нових технологій зберігання і перетворення енергії.

Оскільки існує три просторових напрямки, розрізняють 3D, 2D, 1D та 0D структури, три останні з яких є структурами зі зниженою розмірністю.

3D-структури - це структури з трьома вимірами: довжиною, шириною і висотою. Вони варіюються від розташування атомів у кристалічній решітці до макроскопічної структури будівлі. У матеріалознавстві властивості тривимірних структур часто вивчають, щоб зрозуміти, як їхня мікроструктура

впливає на макроскопічну поведінку. Прикладами тривимірних структур є об'ємні кристали різних матеріалів, кераміка, сипучі матеріали тощо.

2D-структури - це структури з двома вимірами (вертикальним і горизонтальним) і без висоти. До них відносяться тонкі плівки, поверхні та інтерфейси. Ці структури мають унікальні електронні, оптичні та магнітні властивості завдяки своїй зменшеній розмірності і широко використовуються в електроніці та оптоелектроніці. Прикладами двовимірних матеріалів є графен, дихалькогеніди перехідних металів і чорний фосфор.

Одновимірні структури - це структури з одним виміром, такі як нанодроти та вуглецеві нанотрубки. Одновимірні структури мають високе співвідношення сторін, а їхня довжина набагато більша за діаметр. Одновимірні структури можуть демонструвати унікальні механічні, електричні та оптичні властивості завдяки своїй високій анізотропії. Вони мають потенційне застосування в наноелектроніці, зберіганні енергії тощо.

Нульвимірні структури - це структури з нульовими розмірами, такі як наночастинки(квантові точки) та молекули. Ці структури мають певний розмір і форму і можуть проявляти унікальні властивості завдяки своєму малому розміру. Наночастинки мають потенційне застосування в каталітичних реакціях, доставці певних речовин до труднодоступних місць, зондуванні, а молекули - в електроніці та фотоніці.

Повернемося до 2D-структур, а саме до плівок різних матеріалів. Тонкі плівки — це двовимірні структури з товщиною від кількох нанометрів до кількох мікрон. Вони широко використовуються в різних сферах застосування, включаючи електронні пристрої, покриття та датчики.

Тонкі плівки — це двовимірні структури з товщиною від кількох нанометрів до кількох мікрон. Вони широко використовуються в різних сферах застосування, включаючи електронні пристрої, покриття та датчики.

Тонкі плівки можуть демонструвати унікальні електронні, оптичні та магнітні властивості, які відрізняються від властивостей об'ємних матеріалів. Це пов'язано з ефектом квантового обмеження, який виникає через те, що електрони в тонких плівках обмежені на двовимірній площині. Наприклад, у напівпровідникових тонких плівках ширину забороненої зони можна регулювати, змінюючи товщину плівки, що дозволяє керувати електронними властивостями матеріалу.

Тонкі плівки можуть бути твердими або рідкими (рідко газоподібними). Склад, структура і властивості тонкої плівки можуть відрізнитися від об'ємної фази, в якій вона сформована. До твердих тонких плівок відносяться оксидні плівки на металевих поверхнях і штучні покриття, сформовані на різних матеріалах для створення мікроелектронних пристроїв, запобігання корозії і поліпшення зовнішнього вигляду.

Зазвичай тонку плівку одного матеріалу наносять на підкладку з іншого, що приводить до утворення так званої «гетероструктури». На металургійній межі цих матеріалів виникає гетероперехід. Цей перехід використовують для створення потенціальних ям для електронів та дірок. Така можливість з'являється через стрибок краю зони провідності та краю валентної зони (рис.1).

Гетеропереходи утворюються шляхом приведення в контакт або шарування різних кристалічних напівпровідників із чергуючимися або різною шириною забороненої зони. Гетеропереходи в основному використовуються в твердотільних електричних пристроях, також утворюються між двома напівпровідниками з різними властивостями, наприклад, один з яких є кристалічним, а інший - металевим. Якщо функція або використання електричного пристрою залежить від декількох гетеропереходів, їх розміщують, по чергові, у відповідності до виконуваної ними функції. Ці гетероструктури використовуються для збільшення енергії, що виробляється різними електричними пристроями, такими як сонячні батареї та лазери.

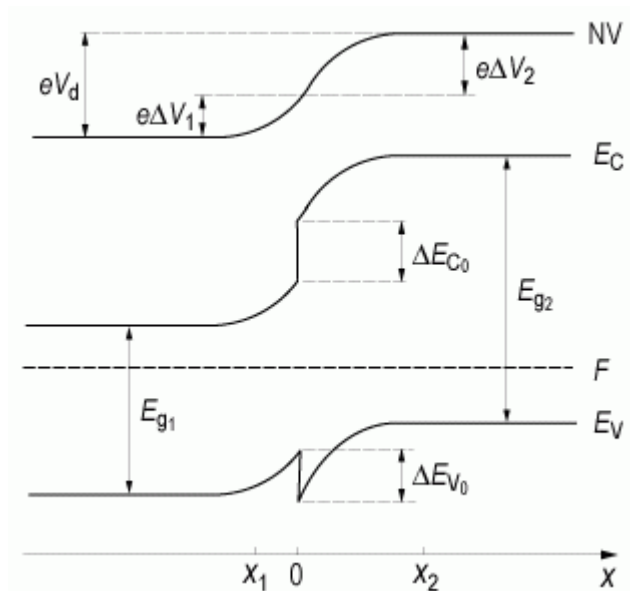


Рис.1.1 Зонна діаграма гетеропереходу n-Ge/p-GaAs в рівноважних умовах

Гетеропереходи утворюються шляхом приведення в контакт або шарування різних кристалічних напівпровідників із чергуючимися або різною шириною забороненої зони. Гетеропереходи в основному використовуються в твердотільних електричних пристроях, також утворюються між двома напівпровідниками з різними властивостями, наприклад, один з яких є кристалічним, а інший - металевим. Якщо функція або використання електричного пристрою залежить від декількох гетеропереходів, їх розміщують, по чергово, у відповідності до виконуваної ними функції. Ці гетероструктури використовуються для збільшення енергії, що виробляється різними електричними пристроями, такими як сонячні батареї та лазери.

Існує три типи гетеропереходів. Гетеропереходи утворюють так звані "обмежені проміжки", "шахові проміжки" і "переривчасті проміжки" на межі розділу між напівпровідниками. Ці гетеропереходи відрізняються залежно від енергетичної щільності, утвореної певним напівпровідниковим матеріалом.

Кількість енергії, яку може виробляти матеріал, безпосередньо пов'язана з розміром енергетичної щільності, створеної гетеропереходом. Тип енергетичної щільності також важливий. Ця енергетична щільність складається з різниці між

валентною зоною одного напівпровідника і зоною провідності іншого напівпровідника.

Гетеропереходи є стандартними для всіх вироблених лазерів, оскільки наука про гетеропереходи стала промисловим стандартом. Гетеропереходи дозволили виробляти лазери, які працюють при звичайній кімнатній температурі. Вперше ця наука була представлена Гербертом Кремером у 1963 році, але вона не стала стандартною наукою у лазерній промисловості лише через багато років після того, як власне матеріалознавство наздогнало базову технологію.

Класифікація гетеропереходів за ступенем перекриття зон.

Гетеропереходи прямого перекриття зон (Direct Bandgap Heterojunctions)

- це тип гетеропереходів, в яких зона провідності і валентна зона безпосередньо перекриваються. У такому гетеропереході максимальне значення зони провідності одного матеріалу збігається з мінімальним значенням валентної зони іншого матеріалу. Це створює більш ефективний шлях для проходження електронів і дірок через перехід. Гетеропереходи з прямою забороненою зоною мають ряд переваг і широко використовуються в електроніці та оптиці.

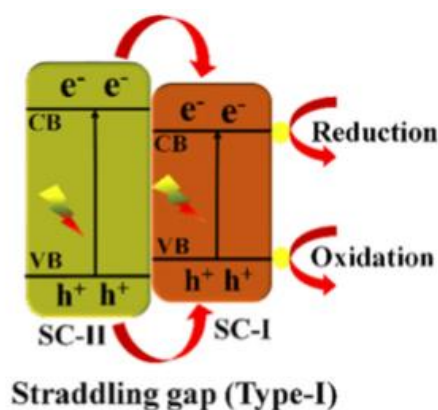


Рис.1.2 Типова енергетична діаграма гетеропереходу з прямим перекриттям зон

Гетеропереходи непрямого перекриття зон (Indirect Bandgap Heterojunctions) - це тип гетеропереходів, в яких зона провідності і валентна

зона перекриваються опосередковано. У таких гетеропереходах максимальне значення зони провідності одного матеріалу не збігається з мінімальним значенням валентної зони іншого матеріалу.

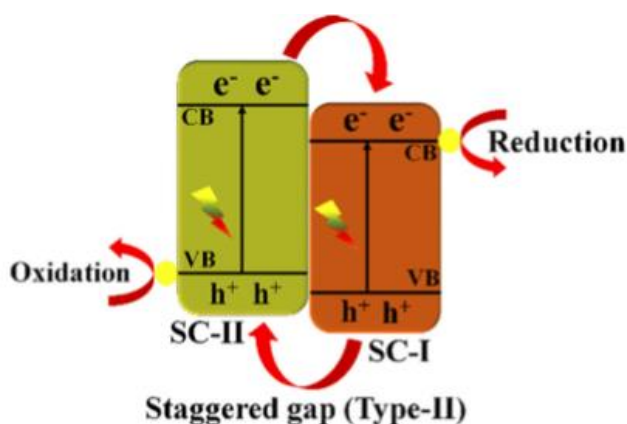


Рис.1.3 Типова енергетична діаграма гетеропереходу з непрямим перекриттям зон

У гетеропереходах з непрямим перекриттям зон перенесення електронів і дірок відбувається за допомогою процесів розсіювання, таких як поглинання і випромінювання фононів. Як наслідок, ефективність перенесення заряду нижча, ніж у гетеропереходах з прямим перекриттям забороненої зони. Однак гетеропереходи з непрямою забороненою зоною все ще широко використовуються в різних пристроях.

Хоча гетеропереходи з непрямою забороненою зоною, як правило, вимагають більш складних процесів виготовлення і мають деякі обмеження по продуктивності, їх унікальні властивості зумовили їх використання в багатьох напівпровідникових пристроях і технологіях.

Гетеропереходи зі слабким перекриттям (гетеропереходи типу III) - це тип гетеропереходів, в яких зони провідності і валентні зони перекриваються дуже незначно або зовсім не перекриваються. Це створює енергетичний бар'єр між двома матеріалами.

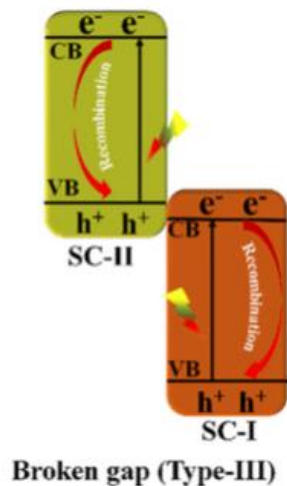


Рис.1.4 Типова енергетична діаграма гетеропереходу зі слабким перекриттям зон

Головною особливістю слабоперекривних гетеропереходів є наявність забороненої зони між зоною провідності та валентною зоною. Це створює бар'єр для вільного руху електронів і дірок через перехід. Перенесення заряду в таких гетеропереходах відбувається переважно шляхом тунелювання електронів і дірок через енергетичний бар'єр.

Для створення гетеропереходів з низьким перекриттям зазвичай потрібні спеціальні технології та матеріали. Гетеропереходи з низьким перекриттям мають унікальні електронні та оптичні властивості, які роблять їх корисними для певних застосувань, таких як інфрачервоне детектування та фотоелектрична енергетика.

Класифікація гетеропереходів за типом провідності.

Ізотипний гетероперехід являє собою тип гетеропереходу, в якому матеріали по обидва боки переходу мають однаковий тип легування. Завдяки своїм унікальним властивостям і потенційним застосуванням, ці гетеропереходи привернули велику увагу у фізиці напівпровідників і приладобудуванні.

Характеристики ізотипних гетеропереходів.

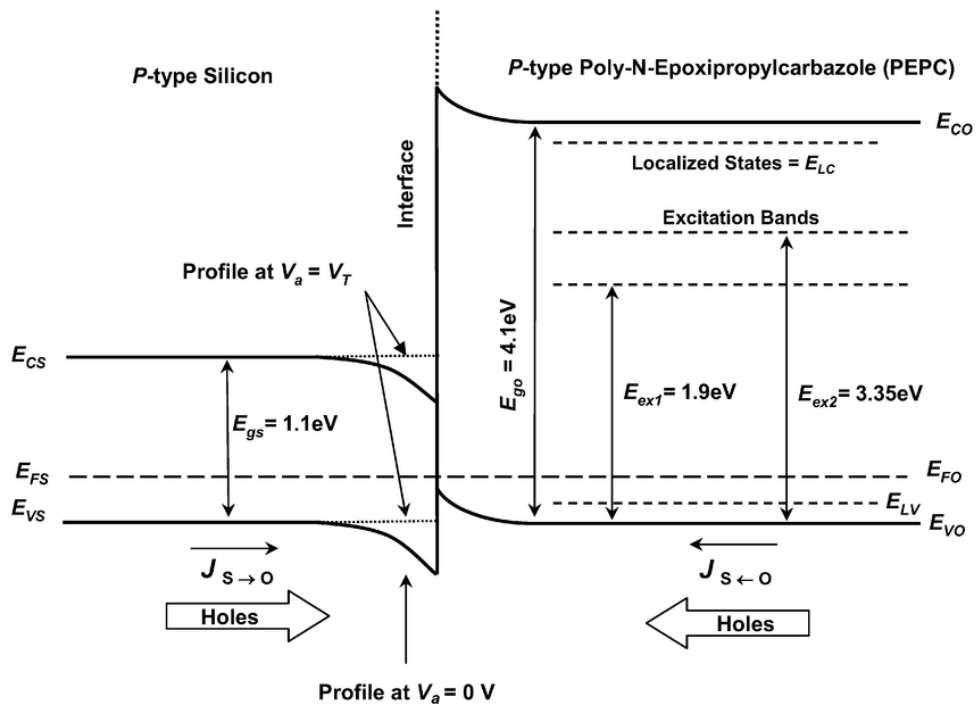


Рис.1.5 Енергетична діаграма ізотипного гетеропереходу

Вирівнювання смуг: однією з ключових властивостей ізотипних гетеропереходів є вирівнювання енергетичних смуг на межі розділу. Мінімум смуги провідності і максимум валентної смуги матеріалу точно вирівняні. Таке пряме вирівнювання смуг забезпечує ефективний транспорт електронів і дірок на переході, сприяючи підвищенню продуктивності пристрою.

Контроль концентрації носіїв: ізотипні гетеропереходи дають змогу точно контролювати концентрацію носіїв на межі розділу. Регулюючи рівень легування матеріалу, можна змінювати концентрацію носіїв і налаштовувати електричні властивості гетеропереходу. Ця особливість дає змогу розробляти пристрої зі специфічними функціями та характеристиками.

Ефект квантового утримання: ізотипні гетеропереходи забезпечують платформу для використання ефекту квантового утримання. Коли розмір гетеропереходу зменшується до нанорозмірів, ефект квантового ущільнення стає більш вираженим. Цей ефект призводить до унікальних електронних і оптичних властивостей, таких як перебудова зазору і посилене оптичне поглинання, що робить ізотипні гетеропереходи ідеальними для застосування в наноелектроніці та нанофотоніці.

Проектування контакту матеріалів: в ізотипних гетеропереходах контакт між матеріалами відіграє ключову роль у визначенні їхніх властивостей. Проектування контакту, таке як пасивація поверхні і контроль поверхневих дефектів, може значно поліпшити характеристики ізотипних гетеропереходів. Це відкриває шлях до оптимізації ефективності пристрою та зменшення небажаних ефектів на межі розділу.

Галузі застосування ізотипних гетеропереходів:

Фотоелектричні пристрої: ізотипні гетеропереходи широко використовуються в сонячних елементах і фотоелектричних пристроях. Точне вирівнювання смуг і контроль концентрації носіїв дозволяють ефективно розділяти і збирати заряд, що призводить до високої ефективності перетворення енергії. Такі матеріали, як кремній (Si) і германій (Ge), часто утворюють ізотипні гетеропереходи в сонячних елементах.

Світловипромінювальні діоди: ізотипні гетеропереходи також використовуються під час розробки світлодіодів. Вирівняні енергетичні смуги полегшують рекомбінацію електронів і дірок, що призводить до випускання світла. Ізотипні світлодіоди на основі гетеропереходів володіють підвищеною ефективністю і чистотою кольору, що робить їх придатними для використання в системах освітлення та відображення інформації.

Транзистори та інтегральні схеми: ізотипні гетеропереходи використовуються для виробництва високопродуктивних транзисторів та інтегральних схем. Комбінуючи матеріали з різною шириною смуги пропускання і рухливістю носіїв, можна домогтися більш високих швидкостей, більш низького енергоспоживання і більш високої функціональності.

Анізотипні гетеропереходи являють собою тип гетеропереходу, в якому матеріали по обидва боки переходу мають різні типи легування (Рис.1). Завдяки своїм унікальним властивостям і різноманітним областям

застосування, ці гетеропереходи привернули значну увагу в галузі фізики напівпровідників і метрології.

Властивості анізотипних гетеропереходів.

Зазор: анізотипні гетеропереходи мають зазор на межі розділу, де мінімум смуги провідності і максимум валентної зони матеріалу не збігаються. Ця невідповідність енергетичних рівнів створює бар'єр для носіїв заряду і впливає на їхнє перенесення через перехід. Розмір і тип смугової щілини відіграє важливу роль у визначенні властивостей і продуктивності пристрою.

Вбудоване електричне поле: анізотипні гетеропереходи мають вбудоване електричне поле, зумовлене розподілом заряду на межі розділу. Це електричне поле може впливати на перенесення носіїв заряду, що призводить до таких ефектів, як розділення носіїв і підвищення ефективності пристрою. Це електричне поле особливо корисне у фотогальванічних та електронних пристроях, де важливе ефективне перенесення заряду.

Поверхневі стани і дефекти: в анізотипних гетеропереходах часто трапляються поверхневі стани і дефекти. Ці стани і дефекти можуть впливати на електронні властивості та ефективність пристрою. Розуміння і контроль станів і дефектів на межі поділу матеріалів важливе для оптимізації роботи пристрою і мінімізації небажаних ефектів, таких як рекомбінація носіїв і струми витоку.

Вигин смуг та інженерія смуг: анізотипні гетеропереходи можуть спричиняти вигин смуг поблизу контакту через наявність вбудованих електричних полів і зсуву смуг. Цей вигин смуги впливає на енергетичні рівні та розподіл носіїв у матеріалі й дає змогу формувати вигини зон. Ретельно підбираючи склад і профіль легування матеріалу, можна регулювати структуру смуг і поведінку носіїв для досягнення бажаної функціональності та продуктивності пристрою.

Використання анізотипних гетеропереходів:

Польові транзистори: анізотипні гетеропереходи широко використовуються при виготовленні польових транзисторів. Завдяки наявності електричних

полів і зсуву смуг, роботою транзистора можна ефективно керувати, включно з модуляцією транспорту носіїв, що призводить до створення високопродуктивних пристроїв з високою швидкістю і низьким струмом витоку.

Фотоприймачі та датчики: анізотипні гетеропереходи використовуються у фотоприймачах і датчиках. Зсув смуг і рівнів інтерфейсу дає змогу ефективно відбивати світло і забезпечувати чутливість до певних довжин хвиль. Фотоприймачі та датчики на основі анізотропних гетеропереходів володіють поліпшеними характеристиками чутливості, детектуваності та спектральної селективності.

Термоелектричні пристрої: анізотипні гетеропереходи використовуються для розробки термоелектричних пристроїв для перетворення енергії. Зсув смуги і властивості перенесення носіїв можуть бути розроблені для поліпшення термоелектричної ефективності та перетворення відпрацьованого тепла в корисну електричну енергію.

Класифікація за межою поділу

Різкі гетеропереходи - це тип гетеропереходу, що характеризується раптовою зміною складу або легування на межі розділу двох матеріалів. Ці гетеропереходи становлять великий інтерес у фізиці та метрології напівпровідників завдяки своїм унікальним властивостям і широкому спектру застосування.

Властивості різких гетеропереходів.

Гострі гетеропереходи мають чітко визначені контактні межі навіть за різких змін складу та легування. Такий різкий перехід дає змогу точно контролювати концентрацію носіїв, структуру смуги та електричні властивості на переході. Гострі межі також мінімізують дифузію і змішування атомів між матеріалами, зберігаючи тим самим їхні відповідні властивості.

Гострі гетеропереходи часто демонструють великі енергетичні зазори на межі розділу. Мінімальне значення смуги провідності та максимальне значення валентної смуги відповідних матеріалів значно зміщені один відносно одного, що призводить до виникнення великого енергетичного бар'єру для носіїв заряду. Цей зазор відіграє важливу роль в утриманні носіїв, тунелюванні та інших транспортних явищах на межі розділу.

Такий різкий характер гетеропереходів може призвести до зниження щільності станів і дефектів інтерфейсу порівняно з іншими типами гетеропереходів. Зниження щільності дефектів покращує загальну продуктивність пристрою за рахунок мінімізації рекомбінації носіїв, струмів витоку та інших шкідливих ефектів. Це також сприяє ефективному вилученню і маніпулюванню носіями заряду в структурі пристрою.

Гострі гетеропереходи часто асоціюються з матеріалами, що демонструють високу рухливість носіїв. Гострі межі розділу мінімізують розсіювання і шорсткість інтерфейсу, забезпечуючи ефективний транспорт носіїв зі зменшеними втратами на розсіювання. Така висока рухливість носіїв корисна для пристроїв, що вимагають швидкої роботи, швидкого перемикання і низького енергоспоживання.

Типові застосування різких гетеропереходів:

Гетеропереходи широко використовуються у високошвидкісних електронних пристроях, таких як транзистори та інтегральні схеми. Великий зазор і зменшена щільність дефектів сприяють поліпшенню перенесення носіїв і зниженню ємності пристрою, що дає змогу збільшити швидкість перемикання, знизити енергоспоживання і підвищити продуктивність у високочастотних застосунках.

Гострі гетеропереходи відіграють важливу роль в оптоелектронних пристроях, таких як лазери, світловипромінювальні діоди (СІД) і фотодетектори. Добре визначений інтерфейс і великий зазор дають змогу ефективно інжектувати,

рекомбінувати та випромінювати носії. Гострі оптоелектронні пристрої на основі гетеропереходів демонструють високу квантову ефективність, низькі порогові струми та покращене відбиття світла.

Гострі гетеропереходи використовуються для виготовлення ефективних сонячних батарей і фотоелектричних пристроїв. Гострі межі розділу і великі смугові проміжки дають змогу ефективно розділяти заряди і мінімізувати втрати на рекомбінацію носіїв. Це підвищує ефективність перетворення енергії та покращує роботу фотоелектричних систем.

Плавні гетеропереходи, також звані градуйованими гетеропереходами, являють собою тип гетеропереходу, що характеризується поступовою зміною складу і легування на межі розділу двох матеріалів. Завдяки своїм унікальним властивостям і різноманітним сферам застосування, такі гетеропереходи становлять великий інтерес у фізиці напівпровідників і приладобудуванні.

Характеристики плавних гетеропереходів

Плавні гетеропереходи характеризуються поступовою зміною складу і легування на межі розділу. Ця поступова зміна дає змогу безперервно змінювати такі властивості матеріалу, як смугова щільність, постійна решітки та концентрація носіїв. Гладка межа розділу також зменшує деформацію і дефекти решітки та покращує загальну якість гетеропереходу.

Плавні гетеропереходи дають змогу проектувати вирівнювання смуг між матеріалами. Ретельно контролюючи склад і профіль легування, можна поступово регулювати мінімальну смугу провідності та максимальну валентну смугу. Таке налаштування вирівнювання смуг забезпечує ефективний транспорт носіїв заряду, сприяє міжзонному тунелюванню і покращує характеристики пристрою.

Плавні гетеропереходи часто мають менше контактних дефектів, ніж гострі гетеропереходи. Поступова зміна складу і легування мінімізує зміщення решітки, дефекти, спричинені деформацією, і міжфазні дислокації. Зменшення

кількості таких дефектів призводить до поліпшення властивостей перенесення носіїв, зниження швидкості рекомбінації та підвищення надійності пристрою.

Плавні гетеропереходи з градованою смуговою щілиною можуть демонструвати широкий спектр поглинання. Поступово змінюючи склад і легування, можна регулювати ефективний зазор у широкому енергетичному діапазоні. Ця властивість особливо корисна для фотогальванічних і фотодетекторних застосувань, оскільки вона може поліпшити оптичне поглинання і підвищити спектральний відгук.

Використання гладких гетеропереходів:

Плавні гетеропереходи широко використовуються в сонячних елементах і фотоелектричних пристроях. Поступову зміну складу і допусків можна використовувати для створення електричного поля, яке ефективно сприяє розділенню і збору зарядів. Масиви спеціальних смуг і широкі спектри поглинання сприяють підвищенню ефективності перетворення енергії та поліпшенню характеристик пристрою.

Плавні гетеропереходи використовують під час розроблення світлодіодів. Ступінчаста зміна профілю смуги пропускання забезпечує ефективну інжекцію і транспорт носіїв заряду, що призводить до поліпшення люмінесценції. Світлодіоди на основі гладких гетеропереходів демонструють поліпшену чистоту кольору, високу зовнішню квантову ефективність і низький спад ефективності.

Плавні гетеропереходи відіграють важливу роль у високопродуктивних транзисторах та інтегральних схемах. Особливе вирівнювання смуг і зменшення дефектів інтерфейсу сприяють поліпшенню властивостей перенесення носіїв, зниженню струмів витоку і підвищенню надійності пристроїв. Згладжувальні пристрої на основі гетеропереходів можуть збільшити швидкість перемикання, знизити енергоспоживання і поліпшити загальну продуктивність схеми.

Нанесення плівки на підкладку з метою створення гетеропереходу може відбуватись широкою різноманітністю способів. Розрізняють два основні блоки методів нанесення тонких плівок: вакуумні та фізико-хімічні.

Термічне розпилення відбувається, коли тверді матеріали нагрівають у камері високого вакууму до температури, за якої виникає певний тиск пари розпилюваного матеріалу. У вакуумі навіть відносно низького тиску пари достатньо, щоб створити хмару пари в камері. Цей потік пари проходить через камеру і вдаряється об підкладку, прилипаючи до неї у вигляді покриття або плівки. Матеріали що наносяться за допомогою методів вакуумного термічного випаровування, можуть бути чистими атомними елементами, включаючи як метали, так і неметали, або можуть бути молекулами, такими як оксиди та нітриди.

У більшості процесів термічного випаровування матеріал нагрівається до температури плавлення і, будучи рідким, зазвичай розміщується на дні камери, часто у вертикальному тиглі. Потім пара піднімається з цього нижнього джерела, а підкладка утримується в перевернутому стані у відповідному пристосуванні у верхній частині камери. Таким чином, поверхня, на яку наноситься покриття, звернена вниз до нагрітого джерела, щоб отримати покриття.

Термовакуумні випарні установки зазвичай складаються з таких основних компонентів:

- Випарні системи: випарні системи, які включають нагрівальні елементи, як-от кристалічні чашки та розплавлені дроти, що використовуються для нагрівання випаровуваного матеріалу до температури його випаровування. Випарні системи можуть також мати стаціонарні чашки для випаровування крихких або термочутливих матеріалів.

- Вакуумна камера: герметичний контейнер, у якому створюється вакуумне середовище. Вакуумна камера містить випарник і підкладку, на яку має бути нанесена плівка. Вакуумні камери забезпечують видалення повітря і газів, запобігають окисленню і забрудненню випаровуваного матеріалу і забезпечують контрольовані умови для термічного випаровування.
- Система контролю вакууму: включає вакуумний насос або систему насосів, які видаляють гази, створюють і підтримують необхідний вакуум у вакуумній камері. Це дає змогу випаровувати матеріали за низького тиску.
- Система подачі газу (не завжди присутня): у деяких випадках використовується система подачі інертного газу, такого як аргон або азот, для створення контрольованого газового середовища навколо випаровуваного матеріалу. Це газове середовище використовується для контролю швидкості та рівномірності осадження, а також для захисту матеріалу від окислення.
- Системи моніторингу та управління: включають датчики та обладнання для моніторингу температури, тиску, швидкості осадження та інших параметрів процесу. Це дає змогу операторам установки контролювати процес і регулювати параметри для досягнення бажаних властивостей плівки.

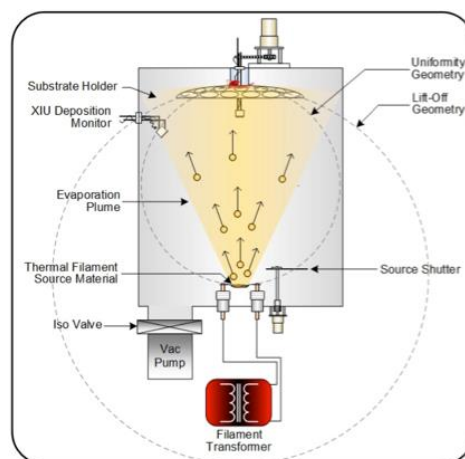


Рис.1.6 Схема установки для вакуумного термічного випаровування

Іонно-променеве розпилення. У технології іонно-променевого напилення мішень заданого складу опромінюється іонним пучком з енергією до 5000 eV, після чого напилений матеріал осідає на підкладку. У цьому випадку стехіометрія ідентична стехіометрії мішені.

Відмінною перевагою цієї технології є те, що покриття не схильні до дрейфу під впливом атмосферних і різних кліматичних умов, що є однією з найважливіших вимог до сучасних оптичних і функціональних покриттів.

До інших переваг технології іонно-променевого напилення належить можливість проведення реактивних і нереактивних процесів в одній камері без перемикання між ними (наприклад, покриття Si, SiO₂ і Si₃N₄ можна отримати з мішеней Si), процес нанесення покриття є низькотемпературним до 900 °C і характеризується низькими температурами до 900 °C, що дає змогу наносити покриття на термочутливі підкладки (наприклад, пластмаси). Вони також можуть бути перенесені на підкладку без зміни властивостей цільового нанокompозитного матеріалу.

Обладнання для іонно-променевого напилення складається з декількох основних компонентів:

- Джерело іонів: джерело іонів, зазвичай іонна гармата або іонна зброя, яка генерує іонний пучок. Джерела іонів можуть генерувати іони різними способами, включаючи розпилення за допомогою електронного циклотронного резонансу (ЕЦР), лазерної іонізації та радіочастотної іонізації.
- Джерело матеріалу, що розпилюється: джерело матеріалу, що розпилюється: джерело матеріалу, що розпилюється: джерело матеріалу, що розпилюється. Доступні тонкі дроти, тонкі плівки та порошки. Для виконання іонно-променевого напилення матеріал повинен бути введений в іонний пучок.
- Камера або реакційна камера Посудина, в якій відбувається іонно-променеве напилення. Камера забезпечує умови, необхідні для реакції

між іонами і напилюваним матеріалом. Для запобігання контакту з повітрям камера може бути вакуумована.

- Система газопостачання: установки для іонно-променевого напилення можуть використовувати газове середовище для контролю умов реакції і захисту матеріалу від окислення. Система подачі газу забезпечує надходження необхідного складу газу в реакційну камеру.
- Система управління: система управління використовується для моніторингу та регулювання всіх параметрів процесу іонно-променевого напилення. Вона може включати програмне забезпечення, датчики та обладнання для моніторингу та контролю температури, тиску, потоку газу та інших параметрів.

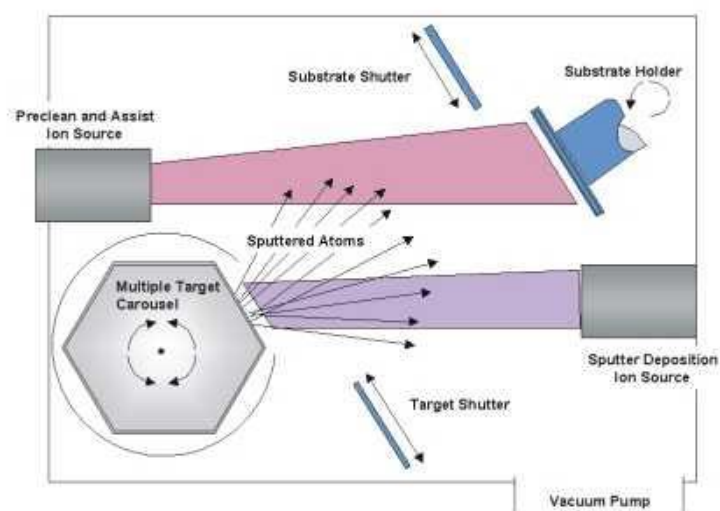


Рис.1.7 Схема установки для іонно променевого розпилення

Електронно-променеове осадження - це різновид методу фізичного осадження з газової фази, в якому матеріал, що використовується для покриття, бомбардується електронним пучком із розігрітої вольфрамової нитки і осаджується на підкладку. Атоми і молекули парової фази потім осаджуються в камері високого вакууму, утворюючи тонку плівку на підкладці.

Електронно-променеове осадження підходить для металів з високою температурою плавлення, оскільки енергія може передаватися

безпосередньо до осаджуваного матеріалу електронним променем. Електронно-променеве осадження дозволяє досягти дуже високої швидкості осадження від 0,1 нм на хвилину до 100 нм на хвилину, що забезпечує високу адгезію до підкладки і формування плівок високої щільності.

Крім того, електронно-променеве осадження дуже ефективно використовує матеріал мішені порівняно з іншими процесами фізичного випаровування, що дозволяє знизити витрати. Електронні пучки нагрівають лише матеріал мішені, а не весь тигель, що призводить до меншого забруднення матеріалом тигля. Концентрація енергії на мішені, а не на всій вакуумній камері, зменшує ймовірність термічного пошкодження матеріалу підкладки.

Кілька різних шарів покриття з різних цільових матеріалів можна наносити за допомогою багатотигельного випарника без порушення вакууму, завдяки чому він легко адаптується до різноманітних методів нанесення, що передбачають використання масок різної форми.

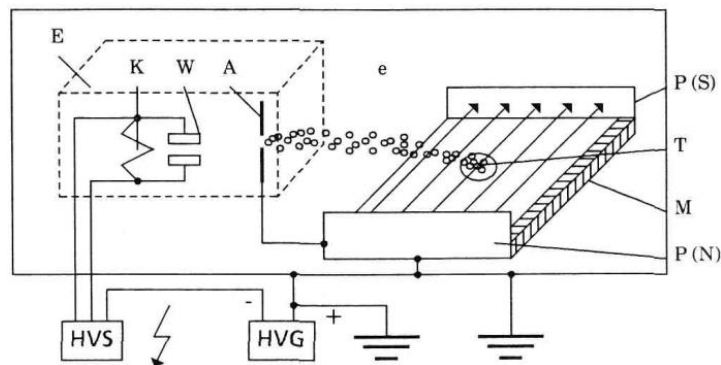


Рис.1.8 Електронно-променевий випарувач. К – катод; W – електричний блок для фокусування; А – анод; М – постійний магніт; Р – полюси магніту; Т – тигель; HVS – нагрівач катоду; HVG – високовольтне джерело живлення; Е – генератор електронного променя

Дугове осадження, також відоме як катодно-дугове осадження, використовує електричну дугу, яка вибиває атоми з катода, які іонізуються поблизу самої дуги. Оскільки вихідна частина дуги у вакуумі є високоіонізованою, процес дозволяє контролювати як траєкторію руху

матеріалу покриття, так і енергію, з якою іони вдаряють по підкладці. Матеріал, що підлягає нанесенню, знаходиться всередині порожнистого катода, який утворює анод. Матеріал на аноді випаровується під дією низької напруги (10-15 В) і високого струму (~100 А) електронного пучка, який іонізує пару разом із захопленими електронами. Дуже низька напруга зводить до мінімуму ризик осідання плівки на катоді. Перевагами цієї технології є її висока промислова сумісність, хорошу адгезію плівки, відмінний стехіометричний контроль, низькі температури, багат шарові компактні покриття, однорідні плівки і низьку напругу. Однак недоліком є складність покриття поверхонь зі складною формою.

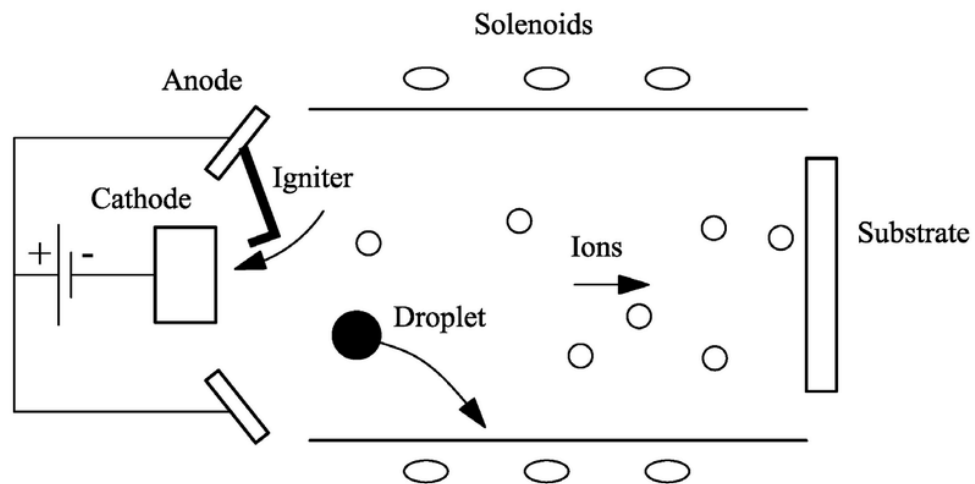


Рис.1.9 Схематична будова установки для вакуумного дугового розпилення

Магнетронне розпилення - це метод осадження, в якому газоподібна плазма генерується і обмежується простором, що містить "мішень" - матеріал, який потрібно осадити. Поверхня мішені розмивається енергійними іонами в плазмі, а вивільнені атоми рухаються у вакуумному середовищі і осідають на підкладці, утворюючи тонку плівку.

У типовому процесі напilenня в камері спочатку створюється високий вакуум, щоб мінімізувати парціальний тиск усіх фонових газів і потенційних забруднювачів. Після досягнення еталонного тиску в камеру вводять газ, з

якого складається плазма, і регулюють загальний тиск за допомогою системи контролю тиску (зазвичай в міліметровому діапазоні).

Щоб ініціювати генерацію плазми, подається висока напруга між катодом, який зазвичай розташований безпосередньо за мішенню, що напильюється, і анодом, який зазвичай з'єднаний з камерою в якості електричного заземлення. Електрони, присутні в розпилювальному газі, прискорюються від катода і стикаються з сусідніми атомами в розпилювальному газі. Це зіткнення викликає електростатичне відштовхування, і відбувається іонізація, коли електрони "вибиваються" з атомів розпилювального газу. Позитивні атоми в розпилювальному газі прискорюються до негативно зарядженого катода, що спричиняє високоенергетичні зіткнення з поверхнею мішені. При кожному зіткненні атоми на поверхні мішені викидаються у вакуумне середовище з достатньою кінетичною енергією, щоб досягти поверхні підкладки. Щоб сприяти якомога більшій кількості високоенергетичних зіткнень і збільшити швидкість осадження, газ для розпилення, як правило, є високомолекулярним газом, таким як аргон або ксенон. Якщо потрібне реактивне розпилення, під час осадження можна також вводити такі гази, як кисень або азот.

Магнетронні джерела розпилення використовують вищезгадане явище і застосовують надзвичайно потужні магніти для утримання електронів у плазмі на поверхні або поблизу мішені. Утримання електронів не тільки збільшує щільність плазми і швидкість осадження, але й запобігає пошкодженню, спричиненому прямим зіткненням цих електронів з підкладкою і плівкою, що росте.

Магнетронне розпилення має низку переваг над іншими методами, оскільки не вимагає плавлення або випаровування сировини. По-перше, магнетронним розпиленням можна осаджувати майже будь-який матеріал, незалежно від його температури плавлення. По-друге, джерело може бути подовжене і розташоване в будь-якому місці камери відповідно до вимог до підкладки і

покриття. Нарешті, можна осаджувати сплави або складні плівки, зберігаючи при цьому той самий склад, що і у вихідної сировини.

Для успішного магнетронного розпилення необхідно вибрати відповідну систему живлення. Магнетронне розпилення доступне в різних конфігураціях джерел і сумісне з багатьма функціями управління процесом.

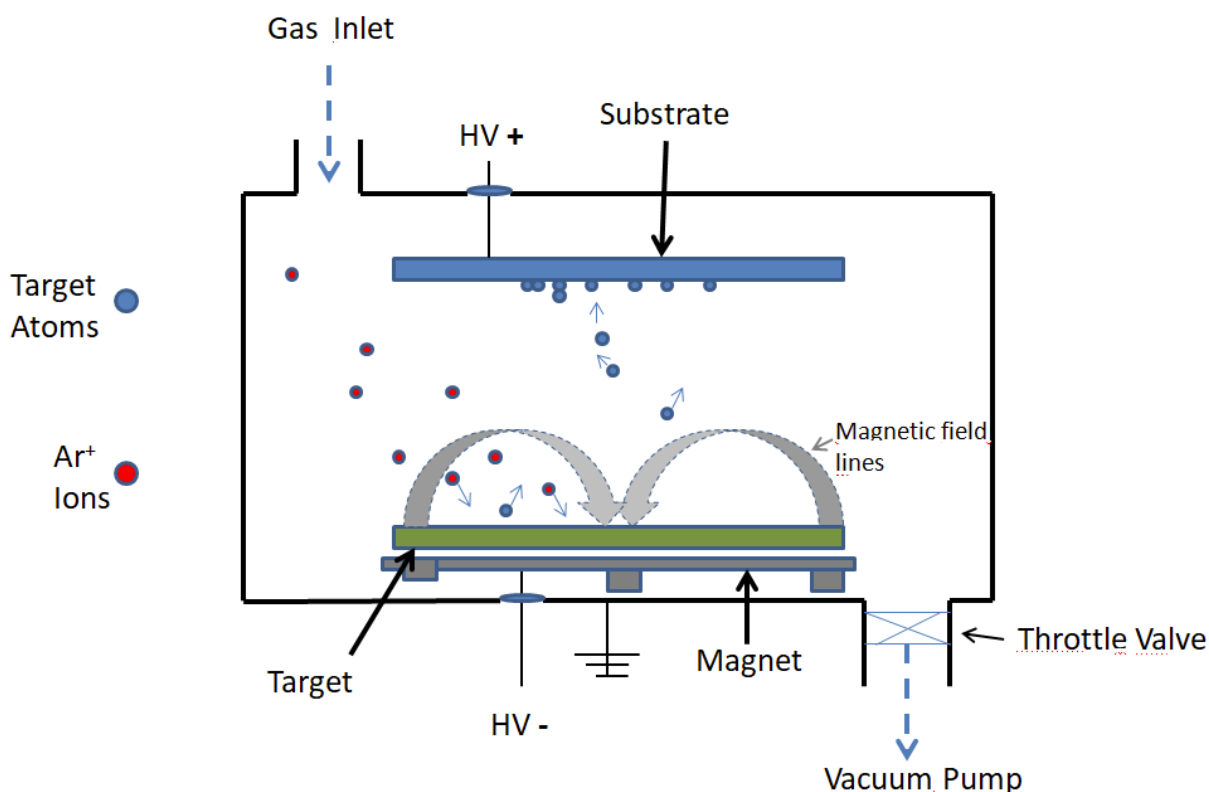


Рис.1.10 Схема установки для вакуумного магнетронного розпилення

Метод спреї-піролізу має низку переваг над іншими методами нанесення тонких плівок, серед яких простіше обладнання, нижчі експлуатаційні витрати, масове виробництво, краща відтворюваність властивостей, вища швидкість росту плівок, більша площа поверхні покриття і легший спосіб легування матеріалів. Формування тонких плівок за допомогою технології спреї-піролізу передбачає розпилення розчину, що містить солі металів (зазвичай це водний розчин), на нагріту підкладку. Тонка плівка зазвичай

складається з дисковидних структур солей металів, що перекривають один одного, які на нагрітій підкладці перетворюються на оксиди.

Основним елементом установки процесу розпилювального піролізу є камера аерозольного розпилення, що містить тримач підкладки з нагрівальними елементами і систему розпилення. Для генерації аерозолів можуть використовуватися повітряний, ультразвуковий або електростатичний методи розпилення; застосування того чи іншого методу визначається властивостями розпилюваного розчину, необхідною швидкістю потоку, розміром аерозольної краплі, можливістю технічної реалізації в певних умовах та іншими факторами. Розпилювані аерозолі відрізняються за трьома основними характеристиками:

- розміром частинок (в середньому від близько 1 мкм до декількох десятків мкм для електрокаталітичних порошків з моно-, бі- або тримодальним розподілом);
- мікроструктурою частинок (пориста порожниста, щільна, композитна, різні композиційні розподіли);
- наявністю активних наночастинок в структурі кожної частинки, при цьому масштабна фаза може зберігатися, а склад цієї нанодисперсної фази може змінюватися від одноелементної до багатокomпонентної композиції.

Важливим аспектом якісної реалізації технології спреї-піролізу з точки зору відтворюваності параметрів одержуваних плівок є автоматизація обладнання для управління і контролю параметрів процесу, таких як температура підкладки і час напилення. Вирішити цю проблему може автоматизація процесу з використанням персональних комп'ютерів та аналогових і цифрових засобів вводу/виводу.

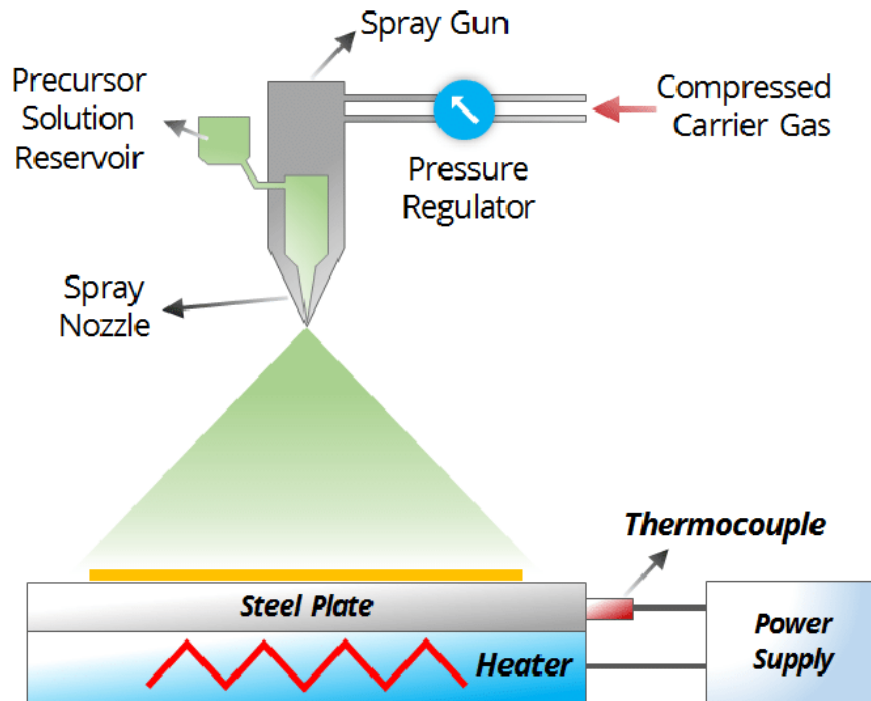


Рис.1.11 Схема установки для спрей-піролізу

Спін-коатінг - це лабораторний метод швидкого виробництва плівок.

Загалом, метод полягає у створенні тонкої плівки шляхом розтікання розчину покриття по підкладці та скидання зайвого об'єму розчину з краю підкладки.

У цьому процесі розчин покриття додається до поверхні підкладки, і відцентрові сили поширюють розчин у вигляді тонкої плівки, де розчинник швидко випаровується, утворюючи рівномірний шар покриття на підкладці.

Товщину плівки можна визначити за допомогою трьох експериментальних параметрів: швидкості випаровування розчинника, швидкості обертання підкладки і в'язкості розчину для нанесення покриття. Тому такі параметри, як кількість прекурсору, швидкість обертання, час обертання і концентрація розчину або твердої речовини, є важливими для контролю формування плівки. Метод часто передбачає додавання декількох органічних добавок для регулювання вмісту твердих речовин, в'язкості та летючості розчину для нанесення покриттів. Цей метод особливо підходить для отримання ультратонких плівок на різноманітних підкладках.

Одним з головних недоліків спін-коатінгу є розмір підкладки. Зі збільшенням розміру стає важче контролювати зменшення товщини плівки, що ускладнює

нанесення покриття на високих швидкостях обертання. Крім того, ефективність використання матеріалу при спін-коатінгу дуже низька. Як правило, 95-98% матеріалу відбраковується під час процесу і переробляється, і лише 2-5% залишається на підкладці.

Ось основні компоненти, зазвичай присутні в спін-коатерах:

- Чаша (платформа): плоска або злегка опукла поверхня, на яку поміщається підкладка для нанесення плівки. Чаша зазвичай виготовляється з хімічно інертного матеріалу і має гладку поверхню для забезпечення рівномірного розподілу плівки.
- Механізм обертання: машина оснащена механізмом обертання, який дає змогу чаші з підкладкою обертатися з високою швидкістю. Це створює відцентрову силу для забезпечення рівномірного розподілу рідкої плівки на поверхні підкладки.
- Дозатор (піпетка): дозатор (зазвичай піпетка або шприц) використовується для нанесення плівки на поверхню підкладки. Диспенсери використовуються для нанесення фіксованої кількості плівки в рідкому вигляді на поверхню підкладки.
- Регулятор швидкості обертання: машина може мати можливість регулювати швидкість обертання чаші. Це дає змогу контролювати товщину й однорідність плівки, що наноситься, відповідно до технологічних вимог.
- Вакуумна система (опціонально): у деяких випадках машина може бути оснащена вакуумною системою для видалення пухирців повітря з плівки, що дає змогу отримати щільніше і гладше покриття.
- Контрольно-вимірювальні прилади: можуть бути оснащені датчиками і манометрами для контролю таких параметрів процесу, як швидкість обертання, температура і час нанесення покриття. Це дає змогу підвищити відтворюваність і контроль якості плівки.

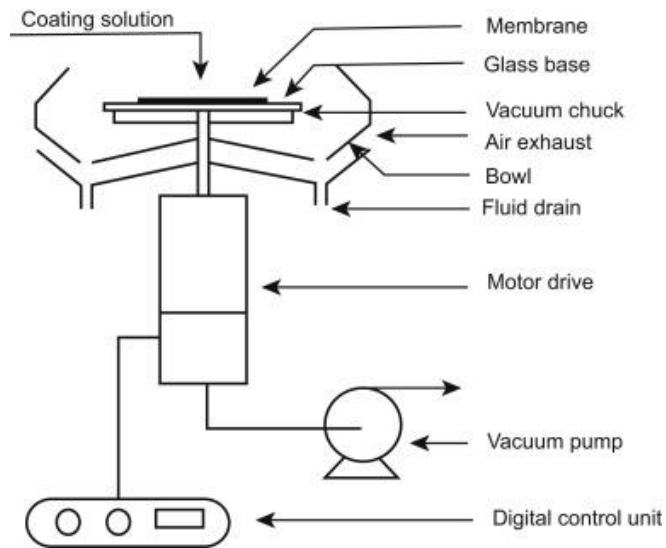


Рис.1.12 Схематична будова спін-коатера

Епітаксія використовується у виробництві напівпровідників для створення ідеального кристалічного базового шару для виготовлення напівпровідникових пристроїв, для осадження кристалічних плівок із заданими електричними властивостями або для покращення електропровідності шляхом зміни механічних властивостей базового шару.

Ціллю епітаксійного росту є повторення нарощуваним шаром періодичності та орієнтації кристалічної ґратки підкладки. Тому постійні ґратки вирощуваного матеріалу та матеріалу підкладки мають відрізнятися не більш ніж як на декілька відсотків.

Принцип процесу епітаксії заснований на явищі дифузії атомів і молекул у твердих тілах. Процес відбувається в спеціальних реакторах або печах із заданими умовами температури, тиску і газового середовища.

Основні етапи процесу епітаксії:

Підготовка підкладки: підкладка (зазвичай це кристалічні матеріали, такі як кремній або германій) має бути ретельно очищена від забруднень і оксидних плівок. Очищення включає механічну і хімічну обробку для забезпечення чистої і гладкої поверхні.

Завантаження в реактор: підкладки поміщають у спеціальний реактор (піч), в якому створюють контрольовані умови для зростання епітаксійних шарів. Реактор заповнюється інертним газом (наприклад, аргоном) або спеціальною газовою сумішшю, залежно від необхідного процесу епітаксійного росту.

Попередня обробка підкладки: деякі процеси епітаксійного росту вимагають попередньої обробки підкладки, наприклад, десорбції або дифузії домішок. Така попередня обробка може проводитися при високій температурі та у вакуумі або в присутності реактивних газів.

Осадження епітаксійної плівки: газ або пару матеріалу, що утворює епітаксійний шар, подають у реактор. За певних температури і тиску, гази вступають у реакцію, і атоми або молекули матеріалу осідають на поверхні підкладки. Шар зростає в міру того, як атоми дифундують поверхнею підкладки і вбудовуються в кристалічну решітку.

Контроль параметрів росту: під час росту епітаксійного шару контролюються різні параметри, такі як температура, тиск, швидкість потоку газу і час росту. Це дає змогу домогтися необхідної товщини, складу і структури епітаксійного шару.

Охолодження і вивантаження. Після завершення росту епітаксійного шару підкладка залишається в реакторі або печі, а потім витягується з системи.

Процес епітаксії може бути доповнений іншими методами, такими як евтектичні реакції, ріст методом молекулярно-променевої епітаксії та ріст методом хімічної парової фази для створення епітаксійних шарів із різними структурами та властивостями.

Властивості тонкої плівки Fe_2O_3 . Плівка Fe_2O_3 напилена методом спреї-піролізу має наступні електричні параметри:

Опір (MΩ)	Питомий опір (Ω*см)	Провідність (10 ⁻² (Ω · м) ⁻¹)	Концентрація носіїв (10 ¹⁷ *см ⁻³)	Рухливість носіїв (см ² /(В*с))
21,5	2,8	0,358	0,15	1,53

Діелектричні властивості. Зростаючий інтерес до діелектричних властивостей оксидів вимагає визначення залежностей зміни діелектричної проникності тонких плівок оксиду заліза. Зменшення діелектричної проникності відбувається, коли частота стрибків заряду не може слідувати за зміною прикладеного електричного поля. Ця діелектрична дисперсія пояснюється максвелівською поляризацією межі поділу і феноменологією Вагнера-Купа. Оскільки поляризація зменшується зі збільшенням частоти і досягає постійних значень, спостерігається зменшення діелектричної проникності з частотою.

Оптичні властивості. Спектр пропускання в діапазоні довжин хвиль 400-1000 нм при перпендикулярному падінні наближається до поведінки напівпровідників через появу інтерференційних максимумів. На довжинах хвиль близько 600 нм світлопропускання матеріалу починає зменшуватися зі зменшенням довжини хвилі. Поглинання фотонів вільними носіями може сприяти зменшенню світлопропускання. У прозорих оксидах металів співвідношення металу до кисню визначає відсоток пропускання. Плівки з більшим вмістом металу зазвичай менш прозорі; широко прийнято вважати, що край смуги поглинання Fe₂O₃ лежить в діапазоні 580-620 нм. Переходи в цій енергетичній області включають d-d переходи, парні збудження і меншу кількість переносів заряду, і зрозуміло, що оптичні властивості краю смуги Fe₂O₃ не можуть бути пояснені власне напівпровідниковими, оскільки перші два переходи в основному є похідними від вузької d смуги. Коротка тривалість життя фотозбуджених електронів в нанокластерах Fe₂O₃ вказує на те, що релаксація сусідніх d-рівнів відбувається швидко. Спектр поглинання показує широке поглинання у видимій області, з хвостом, що простягається

до 646 нм; поріг поглинання при 564 нм (2,2 еВ) майже ідентичний значенню забороненої зони 2,2 еВ для нелегованого Fe₂O₃.

Властивості плівки ІТО. Електричні властивості. Зі збільшенням концентрації Sn питомий опір зменшується, концентрація носіїв заряду збільшується, а рухливість зростає, що свідчить про те, що така поведінка є сприятливою для прозорого провідного оксиду. Результати показують, що виготовлені тонкі плівки ІТО є напівпровідниками n-типу з високим ступенем виродження, збільшення значення концентрації носіїв у тонких плівках ІТО зумовлене різницею валентності між іонами Sn⁴⁺ та In³⁺, яка генерує один додатковий вільний носій на кожне заміщення атома, що призводить до зменшення питомого опору. Введення домішок Sn у плівки оксиду індію суттєво змінює загальні електричні властивості. Отримано мінімальний питомий електричний опір ($3,9 \times 10^{-4}$ Ом/см) і максимальну концентрацію носіїв заряду ($6,1 \times 10^{20}$ см⁻³) для плівок оксиду індію, легуваних Sn на 20%. Збільшення рухливості пов'язане зі зменшенням міжзеренного розсіювання. Електронотранспортні властивості ультратонких плівок повністю пов'язані з мікроструктурою плівки та концентрацією легування.

Оптичні властивості. Середній коефіцієнт пропускання чистої плівки оксиду індію становить 77%, тоді як коефіцієнт пропускання плівки, легуваної оловом, знаходиться в діапазоні 82-87%, і ці результати, ймовірно, пояснюються меншим розсіюванням світла і меншою товщиною.

Встановлено, що край поглинання зміщений у бік коротших довжин хвиль у плівці оксиду індію, легуваної Sn. Спектр пропускання показує прямо протилежну тенденцію до спектру оптичного поглинання. Обидві плівки мають поглинання у видимій області в діапазоні 0,04-1,10%, а низьке поглинання падаючого світла має важливе значення для прозорих провідних оксидів.

Фотолюмінісцентні властивості. Метод фотолюмінесценції при кімнатній температурі (ФЛ) є селективним і надзвичайно чутливим способом визначення положення дискретних електронних станів. При довжині хвилі збудження $\lambda = 310$ нм, плівка ІТО виявляє три основні піки випромінювання. Сильний УФ-пік (363 нм), сильний синій пік (493 нм) і слабкий зелений пік (521 нм). Ультрафіолетовий пік також називають випромінюванням ближнього краю смуги і він є результатом рекомбінації вільних екситонів через процес екситон-екситонних зіткнень. Зміни, що спостерігаються в УФ-піках, вказують на те, що центр рекомбінації змінюється при додаванні Sn. Синє випромінювання також вказує на введення нового дефектного рівня в заборонену зону внаслідок додавання Sn. Виникнення зеленої люмінесценції зазвичай пов'язують з дефектами на глибокому рівні, такими як поверхневі дефекти та одиночні іонізовані вакансії кисню. Різке зменшення інтенсивності всіх піків і зміна положення УФ-піків підтверджує заміщення атомів Sn в межах індієвих центрів.

Експериментальна частина

Під час експерименту на підкладку зі свіжосколотого монокристалічного n-CdTe були почергово нанесені плівки Fe₂O₃ та ІТО методами спреї-піролізу та магнетронним розпиленням на постійному струмі відповідно.

Для нанесення плівки Fe₂O₃ використовувався водний розчин солі FeCl₃·6H₂O концентрацією 0,1М(0,1моль/літр). Напилення проводилося за температури підкладки 350°C.

Прямі зміщення

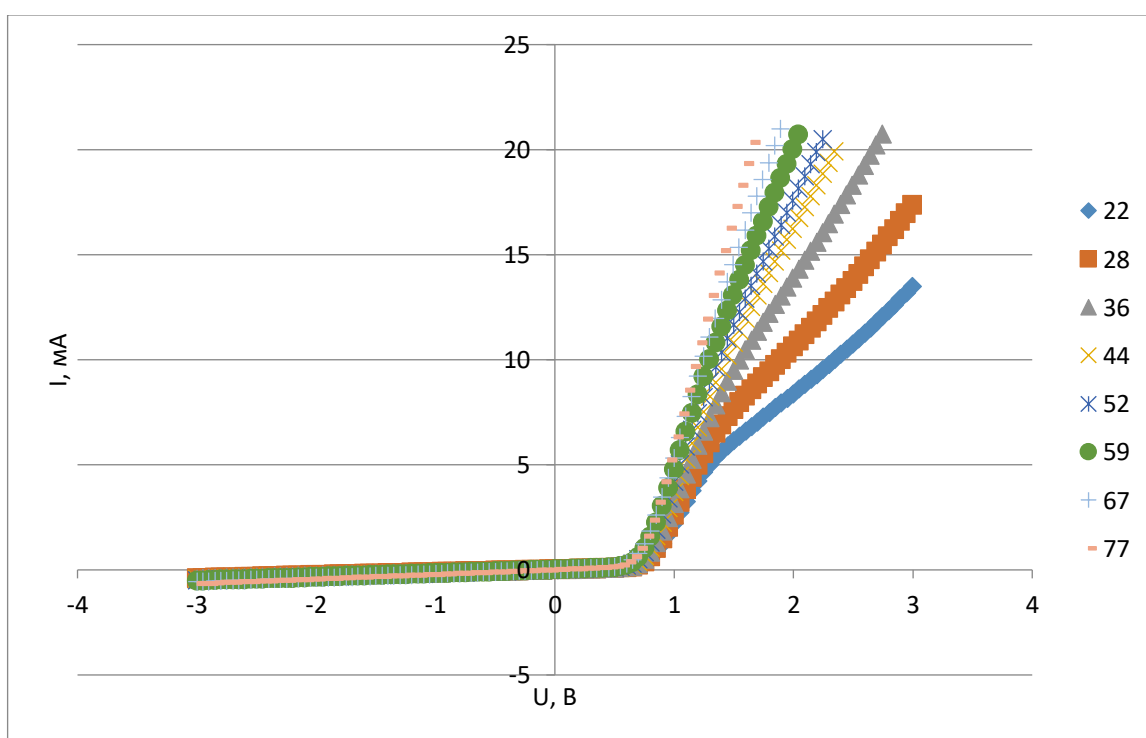


Рис.2.1 Сімейство ВАХ гетероструктури n-CdTe/Fe₂O₃/ITO

На отриманих ВАХ структури n-CdTe/Fe₂O₃/ITO екстраполюємо прямолінійні ділянки до перетину з віссю напруг. Таким чином ми отримуємо значення напруг відсічки. Отримана форма характеристик має дві прямолінійні ділянки, що вказує на те, що даній гетероструктурі притаманні два гетеропереходи. І внаслідок теплової генерації зі зростанням температури злам на прямих гілках ВАХ зникає.

Наявність двох гетеропереходів також підтверджується залежністю диференційного опору від напруги.

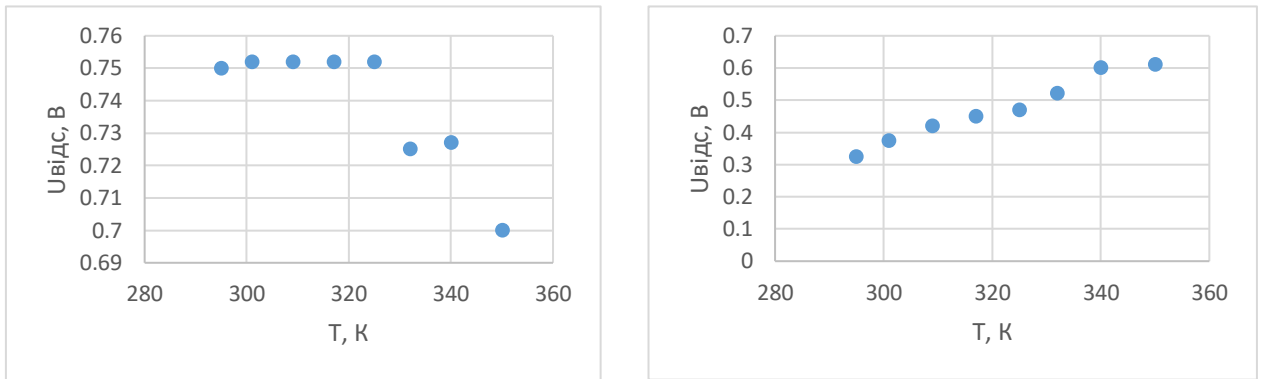


Рис.2.2 Залежності напруги відсічки від температури

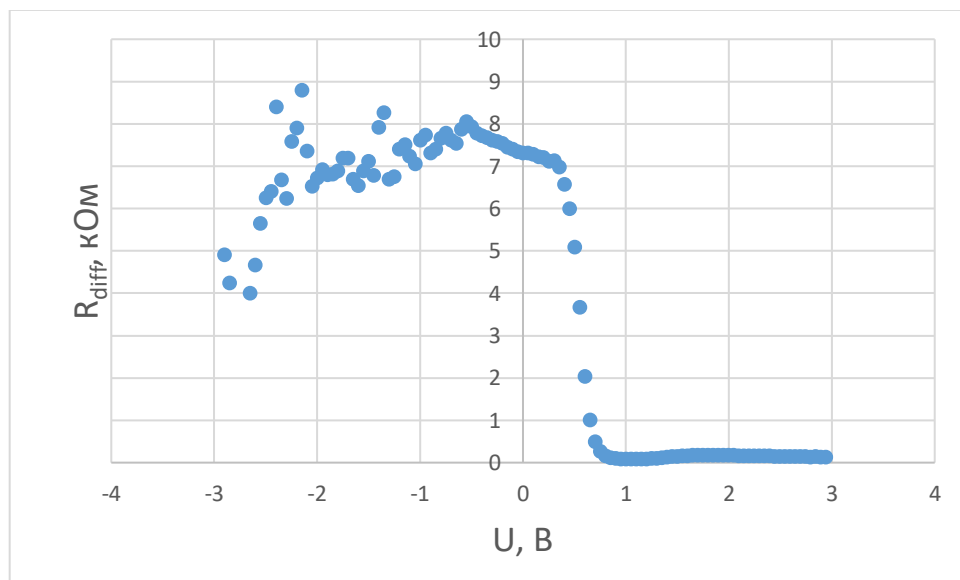


Рис.2.3 Залежність диференційного опору R_{diff} від напруги

Виходячи з аналізу прямих гілок ВАХ побудованих у напівлогарифмічних координатах, у залежностях $\ln I = f(U)$ були виявлені дві прямолінійні ділянки. Визначені, за їх кутом нахилу, значення коефіцієнту неідеальності для різних температур знаходяться в інтервалі від 2,5 до 3,5, з чого можна зробити висновок, що струм змінюється за відмінним від $I = I_0 \exp(qU/nkT)$ законом, притаманним надбар'єрній емісії та рекомбінаційним процесам в області просторового заряду.

Беручи до уваги нахил прямолінійних ділянок $\ln I = f(U)$ та його слабку залежність від різних температур, приходимо висновку, що домінуючим механізмом струмопереносу при прямих зміщеннях є одноступінчасте тунелювання через поверхневі стани. Тоді прямі гілки ВАХ можуть бути описані законом:

$$I = I_s \exp[\alpha_0 V + \beta_0 T],$$

де β та α – деякі постійні.

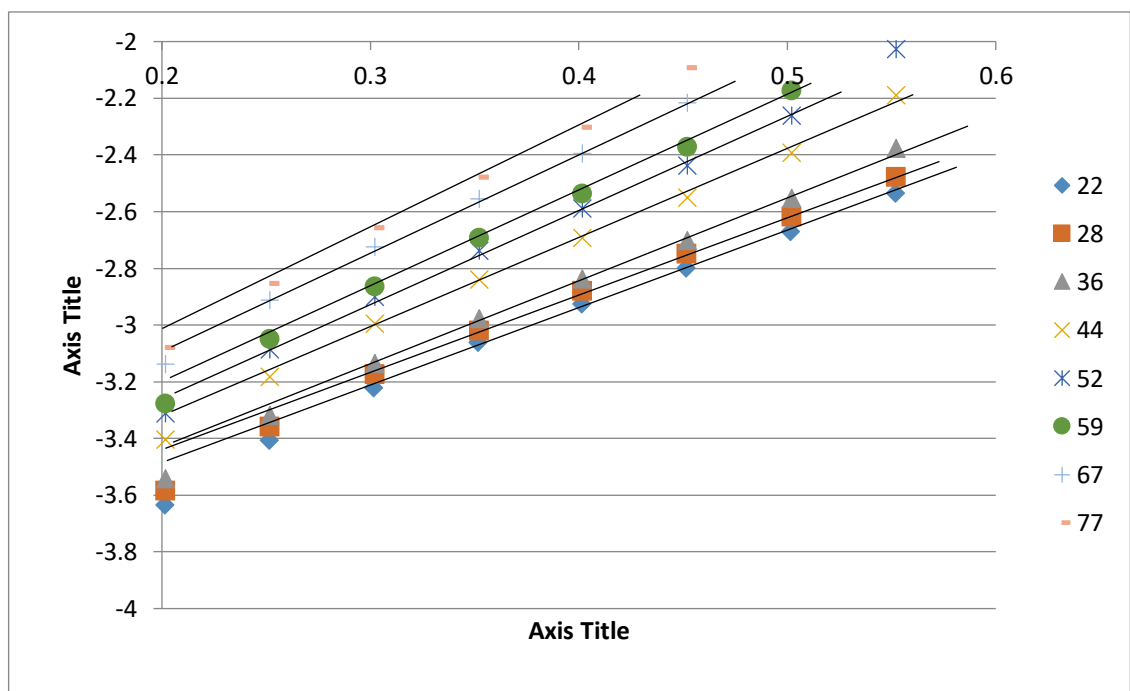


Рис.2.4 Тунелювання носіїв заряду при прямих зміщеннях за різних температур

Зворотні зміщення

За зворотніх зміщень струм лінійно зростає зі зростанням напруги за всіх температур на всьому досліджуваному інтервалі значень напруги(рис.). Така поведінка залежності струму від напруги може свідчити про те, що має місце тунелювання носіїв заряду.

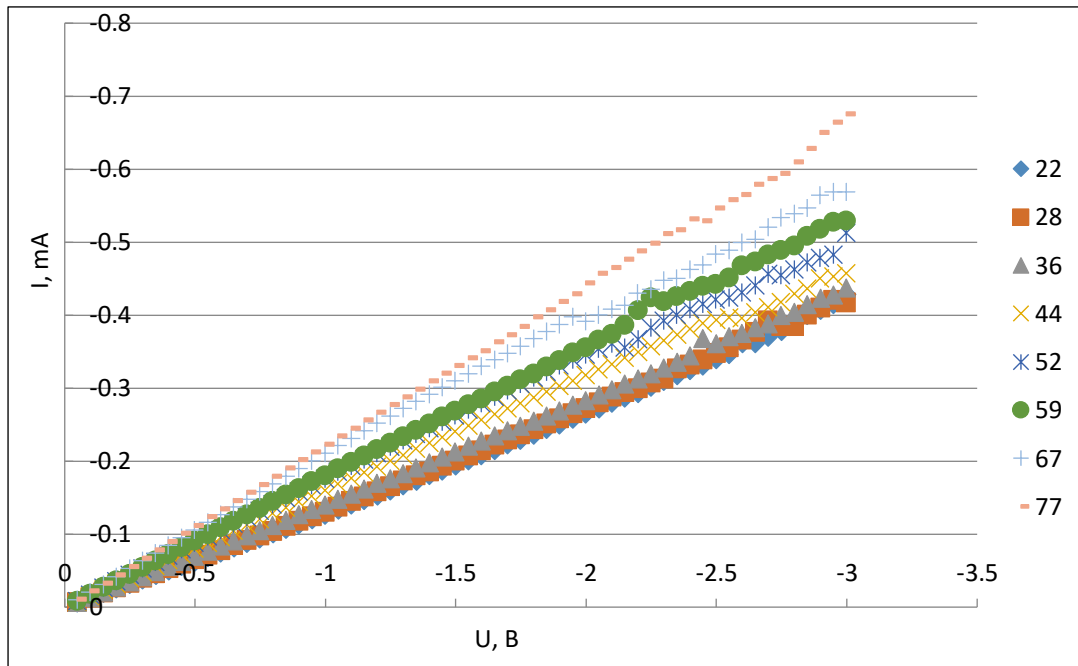


Рис.2.5 Сімейство ВАХ гетероструктури n-CdTe/Fe₂O₃/ІТО за зворотніх зміщень

Виходячи з рівняння для тунельних процесів при зворотніх зміщеннях:

$$I'_{rev} \approx a_0 \exp\left(-\frac{b_0}{\sqrt{\varphi_0 - eV}}\right)$$

де a_0 – параметр, який відображає імовірність заповнення рівнів, за участю яких відбувається тунелювання, b_0 – відображає швидкість зміни струму зі зміною напруги; побудовані в координатах $\ln(I_{rev}) = f[(V_{bi} - V)^{-1/2}]$ залежності мають бути прямолінійними для підтвердження запропонованої моделі струмопереносу, що і спостерігається в інтервалі зворотніх напруг $0 \div 1$ В(рис.). На вставці рис. Зображено залежність послідовнісного опору гетероструктури n-CdTe/Fe₂O₃/ІТО в координатах $R_s = f\left(\frac{1000}{T}\right)$, за нахилом якої визначається глибина залягання рівня за участю якого відбувається тунелювання, і яка складає 0,15eВ.

Також аналіз показав що за напруг $1 \div 3$ В, на зворотніх гілках ВАХ гетероструктури n-CdTe/Fe₂O₃/ІТО, спостерігається проходження струму збуджених з енергетичних пасток на границі розділу матеріалів електронів. Це підтверджується залежністю побудованою в координатах $\ln I_{rev} = f(V)^{1/2}$ (Рис.). Процеси полегшеного електричним полем термічного збудження носіїв заряду, дістали назву емісії Френкеля-Пула.

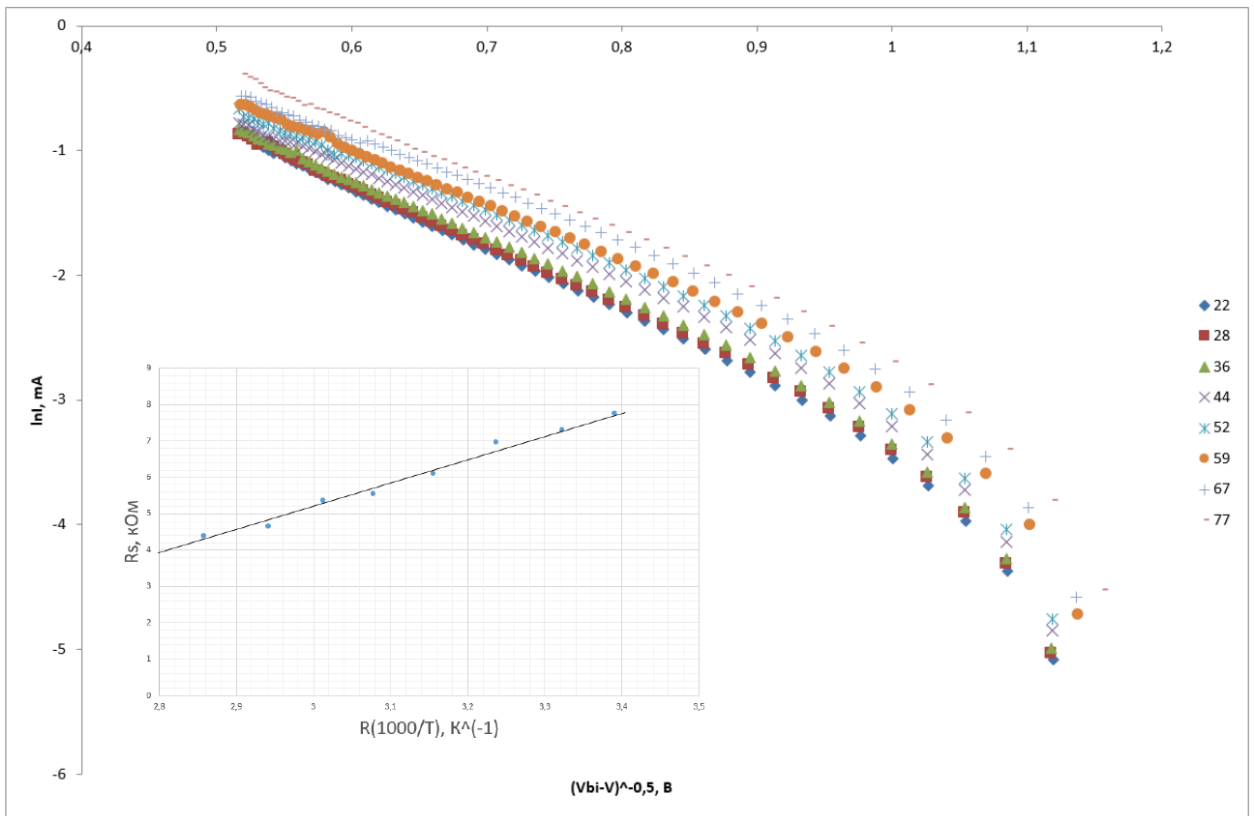


Рис.2.6 Тунелювання носіїв заряду при зворотніх зміщеннях за різних температур; вставка - залежність послідовного опору гетероструктури n-CdTe/Fe₂O₃/ITO від оберненої температури

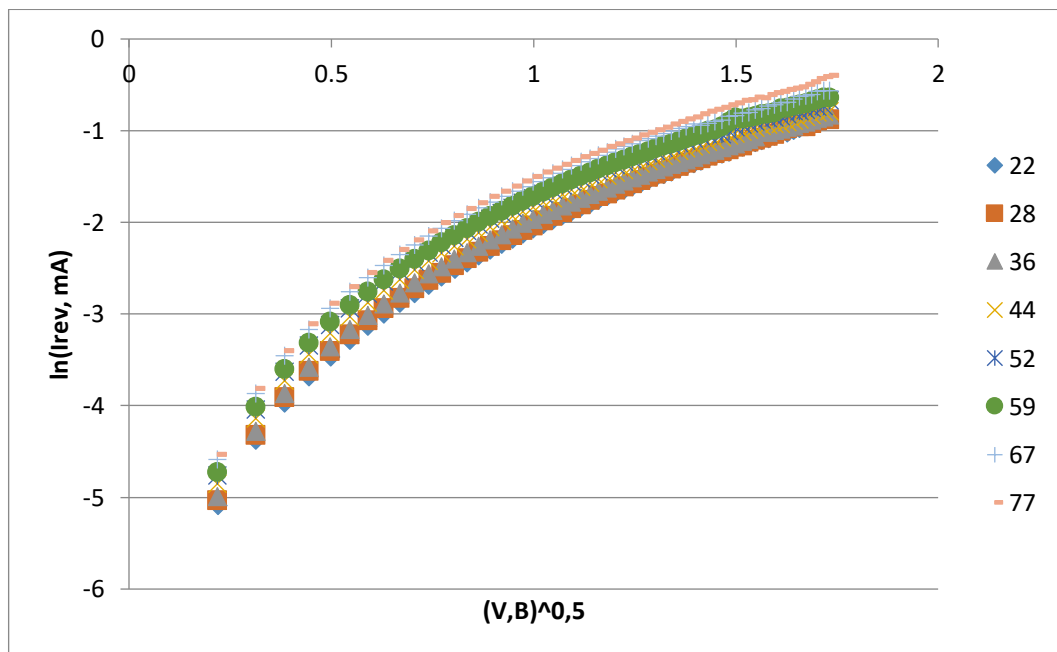


Рис.2.7 Емісія Френкеля-Пула за різних температур

Енергетична діаграма та еквівалентна схема заміщення гетероструктури

n-CdTe/Fe₂O₃/ITO

На основі аналізу отриманих даних та енергетичних параметрів матеріалів, взятих із літератури, використаних для утворення гетероструктури була побудована енергетична діаграма гетероструктури.

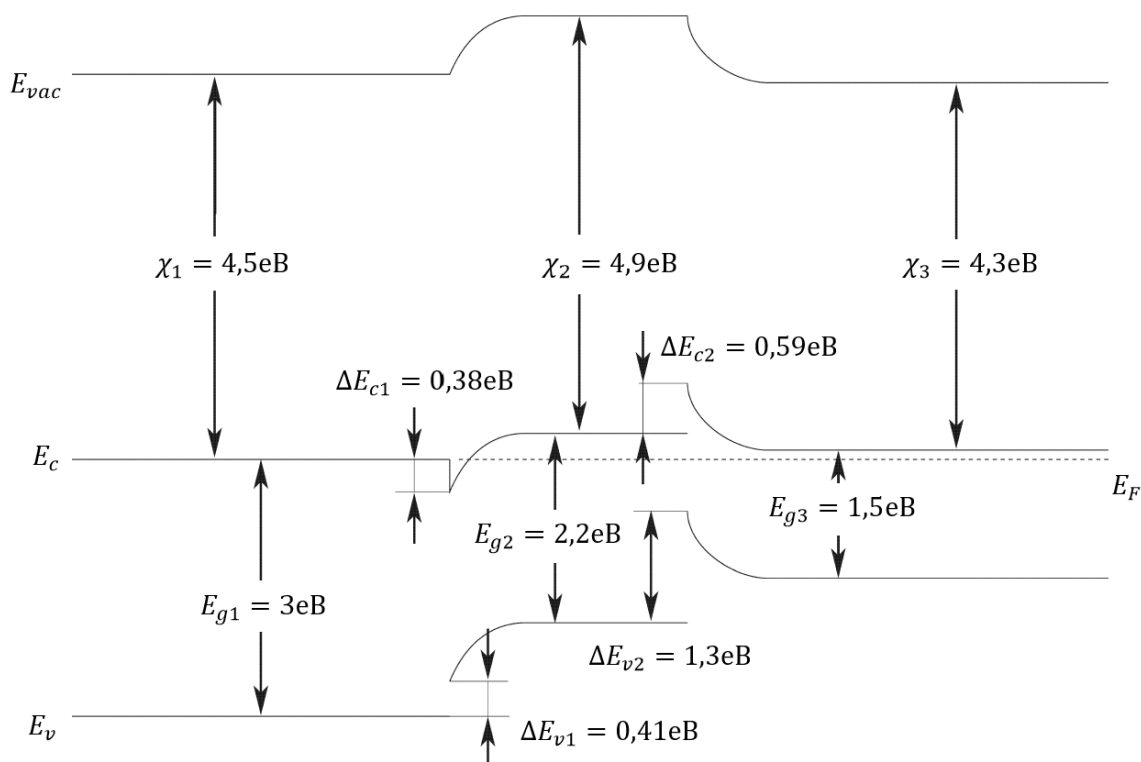


Рис.2.8 Енергетична діаграма гетероструктури n-CdTe/Fe₂O₃/ITO

На діаграмі рис. зображені два гетеропереходи, включені назустріч один одному, якими і пояснюється злам на прямих гілках ВАХ. Висота потенціальних бар'єрів становить близько 0,4 та 0,6 еВ для гетеропереходів ITO/ Fe₂O₃ та Fe₂O₃/n-CdTe відповідно.

На рис. представлена еквівалентна схема заміщення гетероструктури n-CdTe/Fe₂O₃/ITO. Значення шунтуючих опорів Rш1 та Rш2 були визначені із залежності диференційного опору від напруги і становлять 7,2 кОм та 170 Ом відповідно.

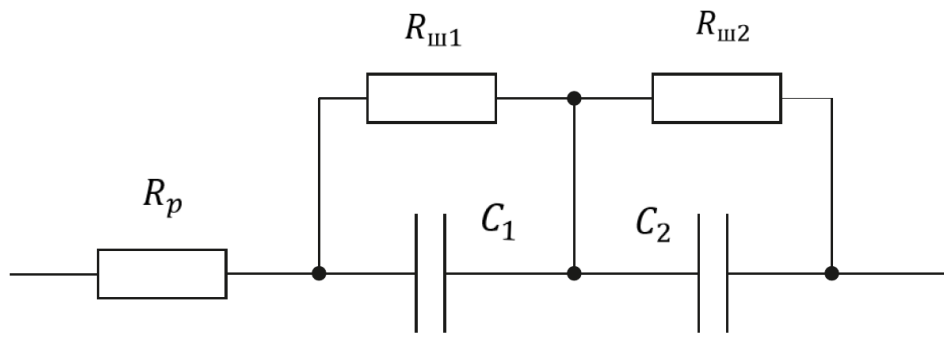


Рис.2.9 Еквівалентна схема заміщення гетероструктури п-
CdTe/Fe₂O₃/ITO

Висновки

На ВАХ гетероструктури за кімнатних температур на прямих гілках спостерігається злам, тобто присутні дві прямолінійні ділянки з різним нахилом. При напругах від 0 до 0,35 В диференційний опір становить близько 7 кОм, а при напругах від 0,8 до 3 В близько 140 Ом. Напруга відсічки першої прямолінійної ділянки становить 0,75 В, а другої ділянки 0,35 В.

Ми вважаємо, що за технологічних умов отримання гетероструктури вона має два гетеропереходи ІТО/ Fe_2O_3 та $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{n-CdTe}$, тобто плівка Fe_2O_3 не є тунельно прозорою, при чому ці гетеропереходи включені назустріч одне одному рис. Це і є причиною появи зламу, тобто один з переходів має великий шунтуючий опір, будемо вважати його основним, а другий має низький шунтуючий опір, який дорівнює диференційному опору більш високовольтної ділянки.

Таким чином ми пропонуємо наступний принцип роботи гетероструктури $\text{n-CdTe/Fe}_2\text{O}_3/\text{ІТО}$: при зворотніх зміщеннях гетеропереходу ІТО- Fe_2O_3 , за рахунок наявності великого $R_{\text{ш1}}$, гетероструктура перебуває у закритому стані, і все падіння напруги відбувається на гетеропереході ІТО- Fe_2O_3 . Такий стан залишається до напруги 0,7 В, при якій перехід ІТО- Fe_2O_3 починає відкриватися, і ця ситуація залишається до зламу на прямолінійній ділянці ВАХ. Після чого падіння напруги відбувається на переході $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{n-CdTe}$, який до того ж зміщений у зворотньому напрямку, але оскільки цей перехід має малий шунтуючий опір $R_{\text{ш2}}$, це не призводить до повного закриття гетероструктури, а лише до зміни кута нахилу прямолінійної ділянки ВАХ. За високих температур вплив другого бар'єру нівелюється за рахунок зростання концентрації носіїв заряду і злам майже зникає. Так само при освітленні білим світлом відбувається генерація нерівноважних носіїв заряду, що також призводить до зменшення $R_{\text{ш2}}$.

При подальшому вдосконаленні такої гетероструктури(якщо добитись великих значень $R_{\text{ш2}}$ за відсутності освітленості) на її базі можна створити

фототранзистор, в якому ІТО та n-CdTe виконуватимуть функції емітера та колектора, а Fe₂O₃ - фоточутливої бази.