

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

Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук

Кафедра електроніки і енергетики

Електричні властивості гетеропереходу SnS₂/CdTe

Дипломна робота

ОКР «Бакалавр»

Виконав: студент 4 курсу, групи 433
Спеціальності: 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва спеціальності)

Фолошня М.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник Грушка О.Г.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № ____

від „__” _____ 2020 р.

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

Чернівці 2020

Анотація

Представлені результати досліджень вольт-амперних характеристик гетеропереходу n-SnS₂/p-CdTe, одержаного методом посадки на оптичний контакт. Показано, що темнові ВАХ відповідають різкому гетеропереходу з коефіцієнтом випрямлення, залежним від температури. Визначено основні діодні параметри: струм насичення I_0 , коефіцієнт η , залежний від механізму перенесення носіїв заряду, контактна різниця потенціалів U_k , енергія активація послідовного опору ΔE . Показано, що при зворотному зміщенні $U_{зв}$ привалюють генераційні струми, в результаті чого зворотній струм $I_{зв}$ не насичується. Крім того, при температурах нижче кімнатної спостерігаються струми витоку.

Відхилення діодних параметрів від ідеальних пояснено впливом дефектів на границі поділу в гетеропереході.

Зміст

Вступ	4
1. Властивості сполуки CdTe	5
1.1 Технологічні аспекти одержання CdTe	5
1.2. Оптичні і фотоелектричні властивості CdTe	7
2. Теорія гетеропереходів	10
2.1. Класифікація і моделі гетеропереходів	10
2.2. Фотовольтаїчний ефект гетеропереходів	13
3. Електричні властивості гетеропереходу SnS ₂ /CdTe	16
3.1. Загальна характеристика гетеропереходу SnS ₂ /CdTe	16
3.2 Вольт-амперні характеристики гетеропереходу SnS ₂ /CdTe.....	18
Висновки	25
ДОДАТОК	26
ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ОХОРОНА ПРАЦІ	26
1. Робота з електровимірювальними приладами та високою напругою	27
2. Пожежна безпека	28
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	31

Вступ

Для фотоелектричних перетворювачів необхідні прямозонні напівпровідники з високими значеннями коефіцієнта поглинання. Можливий варіант вирішення проблеми передбачає використання гетеропереходів. Ці структури володіють такою привабливою особливістю, як ефект вікна, тобто віддалення активної області від поверхні, на якій відбувається рекомбінація. Але крім переваг для цих структур існують складнощі, пов'язані з явищами поблизу або на металургійній поверхні, включаючи рекомбінацію і тунелювання через поверхневі стани. Ускладнення викликаються також розривами країв зон, які до того ж можуть змінюватися під дією заряджених поверхневих станів.

Тому дослідження фізичних процесів, які дозволяють виявити характер поверхневих властивостей в пристроях на основі гетеропереходів, можуть сприяти суттєвим удосконаленням в технології виготовлення фотоелектричних перетворювачів.

В зв'язку з цим тема даної роботи є актуальною.

Метою роботи було дослідження електричних властивостей гетеропереходу $n\text{-SnS}_2/p\text{-CdTe}$, який являє собою нову пару сполучення широкозонних напівпровідників SnS_2 і CdTe . Даний гетероперехід був створений методом посадки на оптичний контакт при кімнатній температурі. Цей метод виключає взаємну дифузію компонент гетеропереходу, яка звичайно відбувається при високотемпературних технологіях виготовлення гетеропереходів і при якій можливі утворення твердих розчинів із компонент переходу. Тому використана технологія одержання гетеропереходу має переваги, які дозволили отримати різкий гетероперехід $n\text{-SnS}_2/p\text{-CdTe}$.

За допомогою вольт-амперних вимірів і визначення діодних параметрів виявлена відмінність експериментального реального гетеропереходу від

ідеального. При цьому зроблені припущення і пояснення спостережених відхилень в значеннях параметрів від теоретично передбачуваних.

1. Властивості сполуки CdTe

1.1. Технологічні аспекти одержання CdTe

Кадмій і телур необмежено розчинні в рідкому стані (при температурі порядку 1000°C) і при затвердінні утворюють сполуку CdTe, яка вступає в евтектичні реакції з кадмієм і телуром, утворюючи в обох випадках вироджені евтектики [1]. Область гомогенності CdTe дуже вузька, розчинність в цій сполуці кадмію і телуру складає по $1 \cdot 10^{-3}$ ат.%, а при 727°C вона складає $2 \cdot 10^{-4}$ ат.% як в бік надлишку кадмію, так і в бік надлишку телуру [2].

Параметр гранецентрованої кубічної решітки CdTe збільшується з підвищенням концентрації кадмію за лінійною залежністю $a = 0.0002C_{Cd} + 0.6346$ нм, де C_{Cd} – концентрація кадмію [3].

Технологічний процес росту монокристалів телуриду кадмію методом Бриджмена складний, і при вирощуванні можливі порушення структури кристалічної решітки, виникнення дефектів і поява неконтрольованих домішок. Для контролю якості вирощених кристалів використовувався рентгеноструктурний аналіз.

Одержані злитки CdTe розрізалися на шайби 1-2 мм, які поетапно шліфувалися і полірувалися абразивними порошками зернистістю від 28 до 1 мкм, що дозволяє одержувати чисту поверхню 13-14 класу. Вдало вибраний процес хімічної поліровки дозволяв одержувати більш якісні поверхні.

CdTe належить до найбільш перспективних напівпровідникових сполук. CdTe має привабливі фізичні властивості: високе безструктурне пропускання в області довжин хвиль 1-30 мкм, низька концентрація власних носіїв заряду порядку 10^6 см⁻³ при 300K, добрі механічні і теплові характеристики (температура плавлення 1092°C, твердість по Круппу 56 кг/мм², коефіцієнт лінійного розширення $4.5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹), стійкість по відношенню до хімічних реагентів і вологості [4, 5].

Ефективний, безпечний і економічний спосіб отримання телуриду кадмію (CdTe), розроблений колективом Вашингтонського університету (WSU), представляє індустрії сонячної енергетики шанс стати більш конкурентоспроможною.

Дослідники продемонстрували нечувану продуктивність їх методу: за один день в печі в умовах високого тиску вони вирощували більше кілограму високочистого кристалічного CdTe, отримуючи вигравш в собівартості до 45% в порівнянні із стандартними промисловими технологіями. Новий метод добре масштабується і в кінцевому рахунку може зробити сонячну енергію дешевше природного газу.

CdTe – це відносно новий конкурент кремнію в області фото електроніки. При відносній ефективності перетворення і кращій ціні, елементи на базі телуриду кадмію більш пристосовані до роботи в спекотному середовищі з високою вологістю. Не дивлячись на переваги, їх доля на ринку сьогодні складає менше 10%, причиною чого є складне і малопродуктивне виробництво. Кристали CdTe зазвичай отримують, підігріваячи вихідні матеріали в запаяній скляній трубці – процедура довга і вибухонебезпечна, а також економічно не вигідна (трубки з кварцового скла використовуються одноразово).

В новій технології використовується міцний графітовий тигель. Його поміщають в піч Бріджмена високого тиску. Перебування матеріалу в такому середовищі усуває ризик вибуху та полегшує внесення легуючих добавок, що поліпшують властивості одержуваного монокристалу.

У 2006 р завдяки добавці фосфору, команді WSU з колегами з Університету Теннессі і Національної Лабораторії відновлюваної Енергії (NREL) подолали бар'єр в 1 вольт, то, чого безуспішно намагалися домогтися у всьому світі протягом шести десятиліть.

У новій роботі, що також виконувалася за участю NREL, і з Nious Technologies в якості виробничого партнера, для легування використовувався миш'як. Високий тиск (близько 80 атмосфер) перешкоджало витоку летючої

добавки з кристала і з напиляємої тонкої плівки, що дозволило уникнути повторного легування телуриду кадмію і пов'язаних з цим проблем нерівномірного розподілу домішки.

1.2. Оптичні і фотоелектричні властивості CdTe

Ширина забороненої зони CdTe становить 1.56 eV при температурі рідкого азоту і повільно спадає до 1.50 при кімнатній температурі 300 К. Мала величина ефективної маси електронів $m^* = 0.11m_0$ вказує на те, що мінімум зони провідності розташований в центрі зони Брілюена. Ширина забороненої зони CdTe близька к оптимальному значені з точки зору використання в сонячних батареях. З монокристалічними фотоелементами був досягнутий ККД порядку 7.7%. Дифузійна довжина дірок дорівнює 0.3 мкм, що відповідає часу життя дірок в n -області $5 \cdot 10^{-10}$ с. Досліджено сонячні елементи із CdTe як із монокристалу, так неоднорідних плівок, одержаних напиленням, від яких при освітленні генеруються дуже високі напруги порядку 100В.

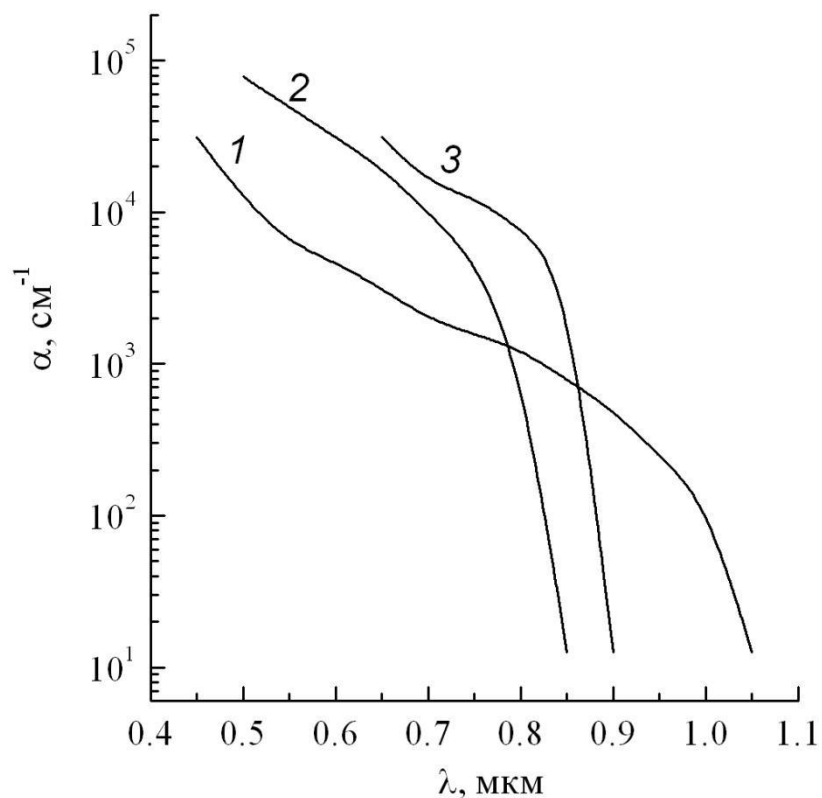


Рис. 1.1. Залежності коефіцієнта поглинання від довжини хвилі падаючого випромінювання при кімнатній температурі для кремнію (1), телуриду кадмію (2) і арсеніду галію (3)

На рис. 1.1 приведені спектри коефіцієнту поглинання α двох найбільш використовуваних в напівпровідниковій фотоенергетиці матеріалів – кремнію і арсеніду галію, а також перспективного матеріалу телуриду кадмію [6]. Саме із цих матеріалів одержані найбільш ефективні сонячні елементи. Відмінності спектральних залежностей коефіцієнта поглинання, приведених на рис., пояснюються зонною структурою і характером оптичних переходів в наведених напівпровідниках. В арсеніді галію і телурид кадмію здійснюються одразу прямі оптичні переходи зона–зона: поглинання різко збільшується при появі в спектрі випромінювання фотонів з енергією, яка перевищує ширину їх забороненої зони і коефіцієнт поглинання α швидко досягає значень 10^4 – 10^5 см⁻¹. Поглинання в кремнію (в основній смузі) починається з непрямих переходів при 1.1 еВ за участю як квантів світла, так і квантів коливань ґратки – фононів, коефіцієнт поглинання збільшується порівняно повільно до значень 10^3 – 10^4 см⁻¹. Тільки при енергії фотонів близько 2.5 еВ переходи зона–зона стають прямими і поглинання різко зростає.

Застосовуючи кремній, можна використовувати для перетворення в електричний струм більшу частину сонячного спектру (випромінювання з довжиною хвилі 1.1 мкм і коротше), тобто більше 74% енергії поза атмосферного сонячного випромінювання. Для арсеніду галію фотоактивним є випромінювання з довжиною хвилі 0.9 мкм і менше і тільки 63% енергії Сонця може бути перетворено в електричну. Для телуриду кадмію енергія Сонця може перетворюватися на електричну при випромінюванні з довжиною хвилі 0.85 мкм і менше, що менше 60% енергії сонячного випромінювання. Але із-за непрямих оптичних переходів і малих значень коефіцієнта поглинання в області основної смуги поглинання товщина кремнієвого сонячного елемента повинна бути не менше 250 мкм, в той час як для прямозонних

напівпровідників (арсенід галію і кадмій телур) аналогічна товщина сонячного елемента може бути не більше 5 мкм. Цю особливість спектральних характеристик поглинання враховують при розробці вискоефективних і дешевих тонкоплівочних сонячних елементів.

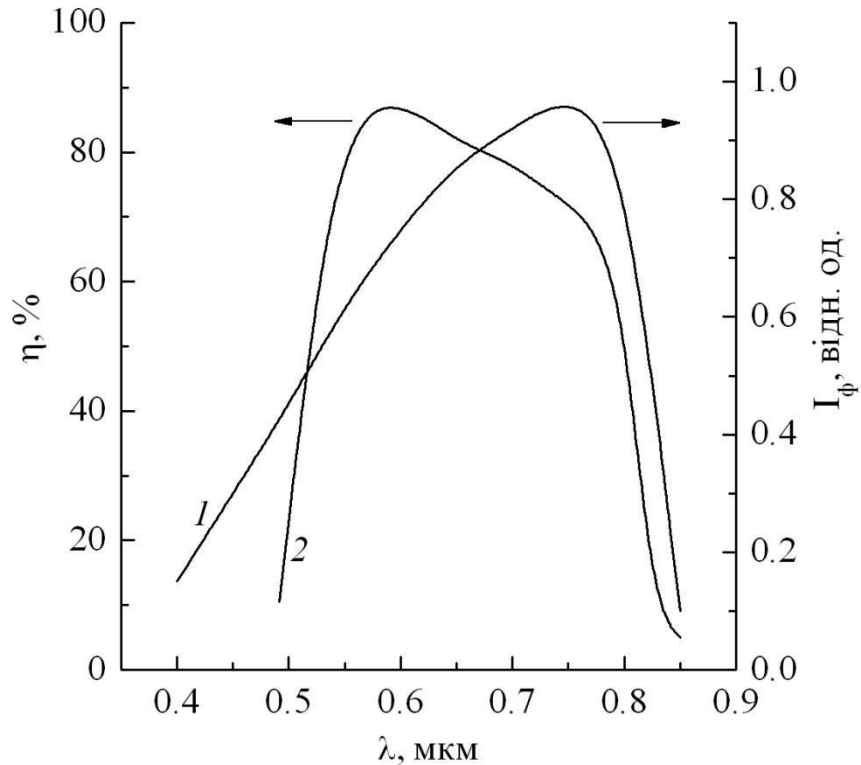


Рис. 1.2. Спектральні характеристики CdTe і гетеропереходу n-CdS/p-CdTe

Як видно з рис.1.2, гетероперехід розширює спектральну чутливість CdTe. Сонячні елементи на основі гетеропереходу n-CdS/p-CdTe заслуговують на увагу завдяки стабільності їх характеристик [7]. Завдяки близьким постійним гратки контактуючих матеріалів в гетеропереході відсутні механічні напруження і рекомбінаційні центри.

Темнові вольт-амперні характеристики гетеропереходу n-CdS/p-CdTe при температурах менше 290 К визначаються тунелюванням і описуються виразом

$$J_{np} = B \exp(\beta T) \exp(\alpha U)$$

(1.1)

із значеннями $\alpha = 22 \text{ В}^{-1}$ і $\beta = 0.015 \text{ К}^{-1}$. При $T > 290 \text{ К}$ діє рекомбінаційний механізм, який описується виразом

$$J \approx J_0 \exp(-\Delta E / kT) [\exp(\alpha U / AkT) - 1]$$

(1.2)

з $A = 1.89$ і енергією активації для J_0 $\Delta E = 0.59 \text{ еВ}$.

Ширина збідненого шару в переході при нульовому зміщенні дорівнює 0.19 мкм , і розташований він в основному в CdTe .

2. Теорія гетеропереходів

2.1. Класифікація і моделі гетеропереходів

Різкі анізотіпні гетеропереходи. Гетеропереходи цього типу, що включають в себе n і p гетеропереходи, є, подібно до p і n -гомопереходам, пристроями з неосновними носіями струму. На відміну від моделі Шоклі для гомопереходів жодна з моделей гетеропереходів, запропонованих різними авторами, не здатна пояснити всі фізичні явища в них. Це пов'язано з тим, що в гетеропереходах властивості границі розділу сильно змінюються від матеріалу до матеріалу і в значній мірі залежать від методу виготовлення. Існуючі моделі анізотіпних гетеропереходів, по суті, можуть розглядатися як узагальнення загальноприйнятою моделі гомопереходів.

Дифузійна модель. У цій моделі, вперше розвиненою Андерсоном і пізніше використаної іншими, нехтується впливом диполів і станів на межі поділу. Типова діаграма енергетичних зон двох ізольованих напівпровідників p і n -типів і діаграма різкого p -гетеропереходу після приведення напів-провідників тісний контакт в умовах рівноваги показані. Діаграма містить «пічок» і «провал» на краях зони провідності поблизу границі розділу і відповідає випадку $>2\%$. Це один з багатьох випадків, розглянутих Ван Рювенон. Передбачається, що два напівпровідника мають різну ширину забороненої зони її, різну діелектричну проникність.

Емісійна модель. Припущення про малих значеннях коефіцієнта пропускання, необхідне для пояснення експериментальних результатів за допомогою дифузійної моделі, частково виключається в емісійній моделі Перлман і Фойхт, в якій враховується вплив «пічка». Ця модель поєднує класичну кінетичну модель для розрахунку емісійних струмів і дифузійну модель для визначення концентрації неосновних носіїв на краях збідненої області. Наприклад, в разі різкого p -гетеропереходу,

коли перенесення заряду здійснюється в основному електронами, ця модель передбачає два різних механізми, що визначають вольт-амперну характеристику: гомопереходний, де проходження струму обмежується накопиченням неосновних носіїв на краях збідненої області, і механізм, зазвичай маючи місце в переході метал - напівпровідник, де струм обмежується потенційним бар'єром на стороні гетероперехода.

Емісійно-рекомбінаційна модель. Ця модель, запропонована Долега, що на границі розділу існує тонкий шар, що має сильно викривлений кристалічний потенціал і велику швидкість рекомбінації, а електрони і дірки досягають границі розділу за допомогою термічної емісії через відповідні бар'єри.

Тунельний механізм був створений для опису вольт-амперних характеристик різкого р-п-гетероперехода та вперше був запропонований Редайкером, Стопеком і Уордом. Ґрунтуючись на аналізі, зробленим Прайсом, вони вважали, що електрони повинні подолати потенційний бар'єр в широкозонному матеріалі або тунелювати крізь нього, щоб рухатися від матеріалу n-типу до матеріалу р-типу або навпаки. Чим саме обґрунтований потік електронів при прямому зміщенні (в основному термічною емісією через бар'єр або тунелюванням крізь нього), в значній мірі залежить від властивостей матеріалу р-типу.

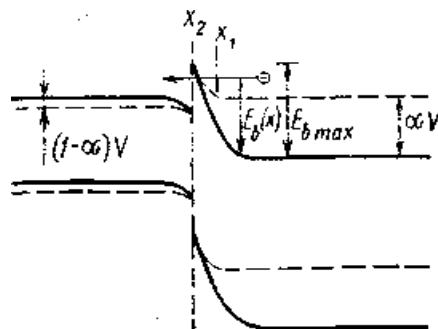


Рис. 2.1. Схематичне зображення тунельної моделі

Тунельно-рекомбінаційна модель. Цікаво відзначити, що схожість між виразами для тунельних струмів в анізотропних гетеропереходах і виразом для надлишкового струму в діоді Есаки призвело Райбен і Фойхт до моделі, заснованої на врахуванні міжзонного тунелювання в поєднанні з процесами рекомбінації. У цій моделі або електрони тунелірують із зони провідності широкозонного матеріалу n-типу на незайняті стани в забороненій зоні вузькозонних матеріалів р-типу і потім рекомбінують з дірками, або дірки тунелюють з матеріалу р-типу в зайняті стани в матеріалі n-типу і потім рекомбінують з електронами.

2.2. Фотовольтаїчний ефект гетеропереходів

При контакті двох різних напівпровідників з різною шириною забороненої зони створюється гетероперехід, в якому основне значення має різка неоднорідність, тобто різкий перехід від напівпровідника з одними властивостями до напівпровідника з іншими властивостями. Така неоднорідність необхідна для створення фотовольтаїчного ефекту, і гетероперехід працює, як джерело струму.

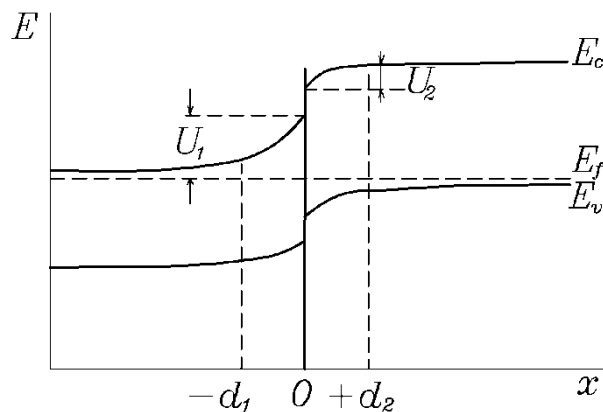


Рис. 2.2. Енергетична діаграма фотоелемента з гетеропереходом при великій густині поверхневих станів. U_1 – напруга на лівій частині гетеропереходу, U_2 – напруга на правій частині гетеропереходу.

d_1 і d_2 – ширина збіднених областей у відповідних частинах від границі гетеропереходу

Теорія фотовольтаїчного ефекту в гетеропереходах базується на їх енергетичних діаграмах [9], і доцільно розглянути два граничних випадки, які відповідають малій і великій концентрації поверхневих станів.

Коли концентрація поверхневих станів велика, область з поверхневими станами можна розглядати як металевий прошарок, який з'єднує два напівпровідника з різною шириною забороненої зони.

В цьому випадку фотоелемент представляє собою два контакту метал-напівпровідник, включені послідовно, і відповідно використовується теорія контакту метал-напівпровідник.

На рис. 2.2 приведена енергетична діаграма фотоелемента з гетеропереходу при великій густині поверхневих станів. Частина гетероперехода, що показана на рис. 2.1 справа працює як фотоелемент з вольт-амперною характеристикою

$$U_2 = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi 2} - I}{I_{02}} + 1 \right), \quad (2.1)$$

де U_2 – напруга на правій частині гетеропереходу, $I_{\phi 2}$ і I_{02} – густини фотоструму і струму насичення.

Аналогічним чином для лівої частини можна записати

$$U_1 = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_{\phi 1} - I}{I_{01}} + 1 \right), \quad (2.2)$$

де U_1 – напруга на лівій частині гетеропереходу, $I_{\phi 1}$ і I_{01} – густини фотоструму і струму насичення.

Оскільки обидва бар'єри включені послідовно і через них протікає загальний струм навантаження, то вольт-амперна характеристика визначається рівнянням

$$U = U_1 + U_2 = \frac{kT}{e} \left[\ln \left(\frac{I_{\phi 1} - I}{I_{01}} + 1 \right) + \ln \left(\frac{I_{\phi 2} - I}{I_{02}} + 1 \right) \right]. \quad (2.3)$$

Із (2.3) слідує, що максимальний струм навантаження не може перевищувати найменшого із фотострумів $I_{\phi 1}$ і $I_{\phi 2}$, і при цьому напруга на виході визначається бар'єром з більшим фотострумом.

В другому граничному випадку, коли поверхневі стані не впливають на форму потенціального бар'єру гетеропереходу, необхідно розглянути наступні варіанти:

а) аналогічно випадку тонкого р-п-переходу, можна знехтувати рекомбінацією об'ємного заряду. На практиці цей варіант практично не реалізується;

б) рекомбінація в області об'ємного заряду відіграє визначальну роль. Максимальна рекомбінація має місце в області, де концентрації електронів і дірок близькі. Але можливий і інший випадок, коли роль центрів рекомбінації виконують поверхневі рівні.

в) рекомбінація здійснюється через центри, на які електрони і дірки поступають за рахунок специфічного квантового ефекту, який називається тунельним. Цей механізм може мати велике значення, коли напівпровідники, які входять до складу гетеропереходу, сильно леговані так, що область об'ємного заряду дуже вузька.

Для першого варіанту теорії а), в якому рекомбінація вважається відсутньою, вольт-амперна характеристика практично не відрізняється від характеристики звичайного р-п-переходу:

$$I = -I_0 \left(\exp \left(\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right) + I_\phi .$$

(2.4)

Для другого варіанту теорії б), в якому рекомбінація в області об'ємного заряду відіграє визначальну роль, вольт-амперна характеристика описується виразом

$$I = I_\phi - I_0 \left(\exp \left(\frac{eU}{AkT} \right) - 1 \right) .$$

(2.5)

Показник експоненти eU/kT залежить від степені легування (N_D і N_A – концентрації донорів і акцепторів) і діелектричних проникностей ϵ_1 і ϵ_2

напівпровідників, що входять в гетероперехід. Якщо $\frac{N_D \varepsilon_1}{N_A \varepsilon_2 + N_D \varepsilon_1} \approx 1$, то $A \approx 1$

, і якщо $\frac{N_A \varepsilon_2}{N_D \varepsilon_1 + N_A \varepsilon_2} \ll 1$, то $A \gg 1$.

Різноманітність можливих діаграм гетеропереходів приводить до великої кількості різних видів вольт-амперних характеристик.

Якщо напівпровідник, в якому утворюється високий бар'єр, який запирає потік відповідних носіїв, дуже сильно легований, то ширина бар'єру може виявитися дуже малою. Коли ширина бар'єру наближається до величини порядку 10^{-7} см, то за рахунок тунелювання, він стає прозорим і більше не перешкоджає проходженню носіїв. Це призводить до вольт-амперних характеристик, в яких експоненціальна залежність струму від напруги не пов'язана з температурною залежністю коефіцієнта в показнику степені.

3. Електричні властивості гетеропереходу SnS_2/CdTe

3.1. Загальна характеристика гетеропереходу SnS_2/CdTe

Гетероперехід SnS_2/CdTe – це перехід між двома різними напівпровідниками n- SnS_2 і p- CdTe . Цей перехід належить до різких, в яких перехід здійснюється в кількох міжатомних відстаней (≤ 1 мкм). Напівпровідники, що знаходяться в контактні, мають різні типи провідності, тому гетероперехід називається анізотипним. Для створення гетеропереходу були використані монокристали SnS_2 і CdTe , вирощені за методом Бриджмена.

Зразки SnS_2 мали провідність n-типу з концентрацією електронів $n = 3 \cdot 10^{15}$

$n = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ і рухливістю $95 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, які практично не залежали від температури. Зразки CdTe були p-типу провідності з концентрацією дірок

$p_0 \cong 1 \cdot 10^{14}$ $p_0 \cong 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ і рухливістю $\mu_p \cong \mu_p \cong 50-80 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при кімнатній

температурі.

Для виготовлення гетеропереходу використовували метод посадки на оптичний контакт. Спочатку зразки (підкладки) CdTe шліфувались, полірувались механічним і хімічним способами. Потім пластинки SnS₂ товщиною порядку 10 мкм від'єднувались від відповідного злитку і ніякої обробки не вимагали. При накладанні цих пластинок на підкладку після легкого притискання, вони щеплювались з підкладкою і утворювали контакт. Міцність контакту визначалася міжатомною взаємодією контактуючих матеріалів завдяки адгезії. Електричні контакти виготовлялись наплавленням індію.

Різні параметри контактуючих матеріалів: ширини забороненої зони $E_{g1} \neq E_{g2}$ (для SnS₂ $E_{g1} = 2.07$ eV; для CdTe $E_{g2} = 1.5$ eV при 300K) і діелектричної проникності $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ приводять до того, що при їх з'єднанні виникають потенціальні бар'єри різної висоти для електронів і дірок. При цьому повна контактна різниця потенціалів U_{κ} , яка обумовлена різницею робіт виходу ($\varphi_1 - \varphi_2$), може бути представлена як сума контактних різниць потенціалів, що припадають на напівпровідники 1 і 2 $U_{\kappa} = U_{\kappa1} + U_{\kappa2}$.

Електростатичне поле на межі розділу має розрив внаслідок різних діелектричних проникностей. Для різких гетеропереходів характерні розриви зон. Ці розриви приводять до появи дефектної поверхні поділу. При невідповідності параметрів ґратки може спостерігатись домінування тунельного струму.

Існує кілька моделей різких анізотипних гетеропереходів, які описують вольт-амперні характеристики (ВАХ) в залежності від механізмів переносу носіїв заряду. Найбільш поширеними є наступні моделі: дифузійна, емісійна, емісійно-рекомбінаційна, тунельна, тунельно-рекомбінаційна. Але не завжди за їх допомогою вдається пояснити експериментальні результати. Можливо це

пов'язано з існуванням більш складних процесів і механізмів протікання струму, які треба враховувати.

В той же час практично всі експериментальні ВАХ гетеропереходів можуть бути пояснені з використанням узагальненої моделі, в якій процеси визначаються тепловими струмами, обумовленими носіями, що долають потенціальні бар'єри, проходячи через гетероперехід. Ці струми можуть бути записані у вигляді:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eU}{\eta kT}\right), \quad (3.1)$$

де

$$I_0 = A \exp\left(-\frac{eU_\kappa}{kT}\right),$$

де U_κ – напруга на бар'єрі (контактна різниця потенціалів) при відсутності зовнішньої напруги, η – величина, яка характеризує зміну бар'єра під дією прикладеної напруги і визначає тип домінуючого процесу, A – коефіцієнт.

3.2. Вольт-амперні характеристики гетеропереходу SnS_2/CdTe

Темнові вольт-амперні характеристики гетеропереходу на постійному струмі були досліджені в температурному інтервалі 255-330К. Одержані ВАХ приведені на рис. 3.1.

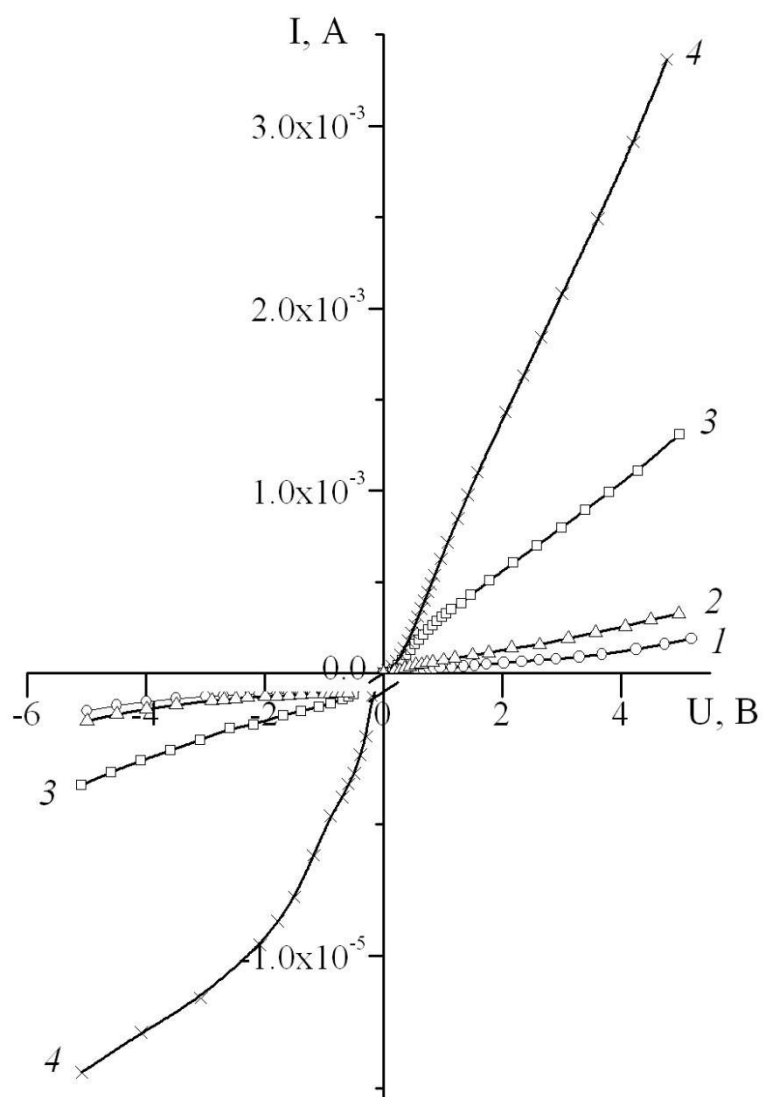


Рис. 3.1. Вольт-амперні характеристики гетеропереходу SnS_2/CdTe в залежності від температури T , К: 1 – 255.7, 2 – 268.6, 3 – 298.1, 4 – 330.2

Як видно із рисунку ВАХ мають випрямляючий характер з коефіцієнтом

випрямлення $K = \frac{I_{np}}{I_{зв}}$ (I_{np} і $I_{зв}$ при напрузі $U = 1$ В), залежним від

температури. Для ВАХ 1, 2, 3, 4 $K_1 = 1872$, $K_2 = 922$, $K_3 = 621$, $K_4 = 125$.

Побудувавши ВАХ в напівлогарифмічному масштабі $\lg I = f(U)$, при $U < U_\kappa$ одержали лінійні ділянки (рис. 3.2), що є підтвердженням експоненційної залежності $I = f(U)$ типу рівняння (3.1). Нахил цих лінійних ділянок визначає значення $e/\eta kT$, де η – діодний параметр змінюється $\eta_1 = 3.9$, $\eta_2 = 3.7$, $\eta_3 = 3.4$, $\eta_4 = 3.0$.

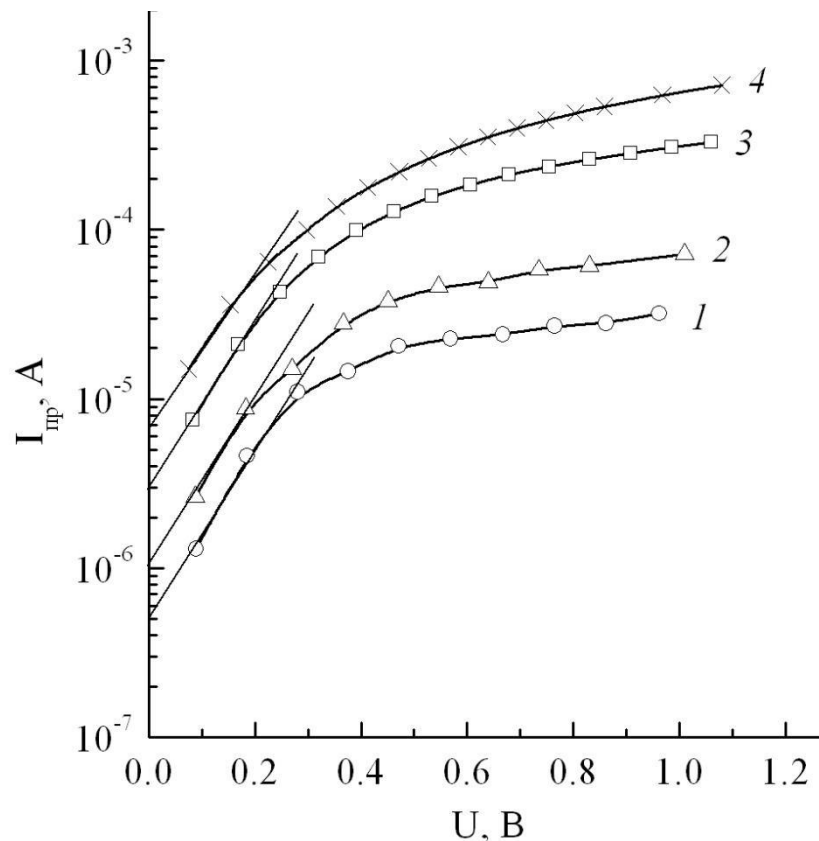


Рис. 3.2. Вольт-амперні характеристики гетеропереходу SnS_2/CdTe в напівлогарифмічних координатах в залежності від температури T , К:

1 – 255.7, 2 – 268.6, 3 – 298.1, 4 – 330.2

Одержані величини η перевищують відоме значення $\eta = 2$ для струму, який визначається рекомбінаційними процесами при переносі носіїв заряду через гетероперехід. Це може бути пояснено порушенням періодичності ґратки із-за різниці періодів решітки в області контакту. Це самий суттєвий дефект, який приводить до виникнення поверхневих станів, які і визначають механізми перенесення струму через бар'єр. В цьому випадку крім рекомбінаційних процесів може приєднатися туннелювання.

Другим важливим діодним параметром є I_0 , який знаходили, екстраполюючи лінійні ділянки $\lg I = f(U)$ (рис. 3.2) до перетину з віссю струмів при $U = 0$. Одержані значення $I_0 = f(T)$ приведені в таблиці, звідки видно, що із збільшенням температури I_0 зростає.

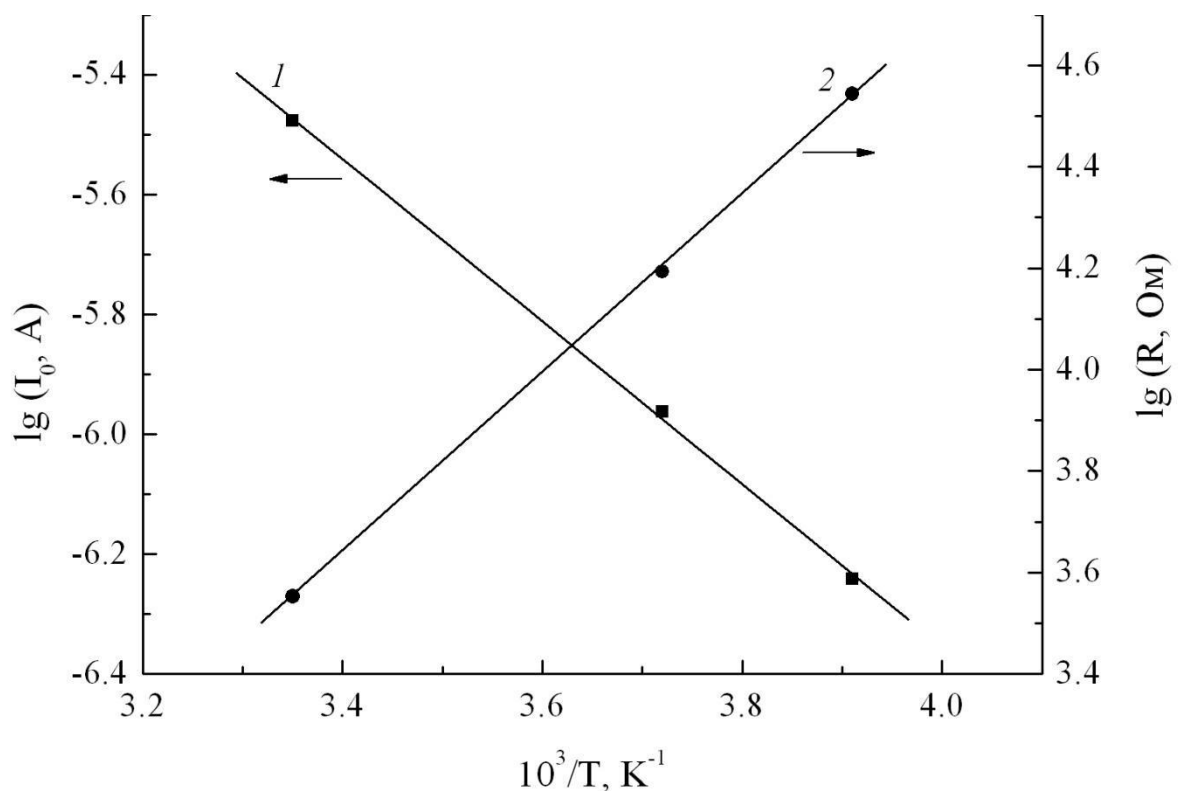


Рис. 3.3. Температурні залежності I_0 і послідовного опору R
гетеропереходу SnS_2/CdTe

Згідно виразу (3.1) хід функції $I_0 = f(T)$ характеризується експоненціальним множником, а коефіцієнт A перед експонентою в дослідженому інтервалі температур можна вважати практично постійним. Отже,

$$\lg I_0 = A - \frac{0.43 \cdot e U_\kappa}{k \cdot 10^3} \cdot \frac{10^3}{T} \quad (3.2)$$

В цьому випадку кутовий коефіцієнт прямої визначається контактною різницею потенціалів U_κ

$$\text{tg} \alpha = \frac{\Delta \lg I_0}{\Delta(10^3 / T)} = \frac{0.43 \cdot e U_\kappa}{k \cdot 10^3}, \quad (3.3)$$

де $k/e = 8.6137 \cdot 10^{-5}$ еВ/К. Звідки $U_\kappa = 0.2 \text{tg} \alpha$.

Визначаючи $\text{tg} \alpha$ із рис. 3.3 знайшли, що $U_\kappa = 0.27$ В.

При прямих напругах U_{np} , які перевищують контактну різницю потенціалів $U_{np} > U_\kappa$, ВАХ являють собою прямолінійні ділянки, нахил яких зростає з підвищенням температури, що пов'язано із зменшенням опору базового матеріалу R (таблиця). Опір R експоненційно залежить від енергії активації ΔE у відповідності з виразом

$$R \sim \exp \frac{\Delta E}{kT} \quad (3.4)$$

Побудувавши залежність $\lg R = f(10^3 / T)$, приведену на рис. 3.3, за її нахилом, подібно до попереднього випадку, визначили енергію активації $\Delta E = 0.35$ eV.

Таблиця. Параметри гетеропереходу SnS₂/CdTe

№	T , К	K	η	I_0 , А	R , Ом
1	255.7	1872	3.9	$5.74 \cdot 10^{-7}$	$3.5 \cdot 10^4$
2	268.6	922	3.7	$1.09 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^4$
3	298.1	621	3.4	$3.53 \cdot 10^{-6}$	$3.7 \cdot 10^3$
4	330.2	125	3.0	$6.69 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^3$

При обговоренні ВАХ при зворотному зміщенні треба враховувати, що n-p-гетероперехід містить три області: n-область, p-область і область об'ємного заряду (бар'єр), яка знаходиться посередині. Область об'ємного заряду дуже сильно, практично повністю, збіднена вільними носіями заряду – електронами і дірками. Тому вона має самий великий опір, і практично вся прикладена напруга U падає на цій області.

При зворотному зміщенні поле від зовнішнього джерела співпадає по напрямку з полем в середині області об'ємного заряду. Тому спад напруга від зовнішнього джерела U додається до напруги на переході U_κ , яка існувала до прикладання зовнішнього зміщення. В результаті висота потенціального бар'єра між n- і p-областями стає рівною $U_\kappa + U$, а висота енергетичного бар'єру відповідно $e \cdot (U_\kappa + U)$. Для різко несиметричного гетеропереходу,

коли $N_A \gg N_D$, практично вся напруга на бар'єрі спадає на n-області, і ширина області об'ємного заряду визначається виразом:

$$W = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_0(U_k + U)}{eN_D} \right]^{1/2}, \quad (3.5)$$

де ϵ – діелектрична проникність, ϵ_0 – електрична стала, N_A – концентрація акцепторів в р-області і N_D – концентрація донорів в n-області.

Отже, при прикладанні до гетеропереходу зовнішньої напруги вільні носії заряду витісняються із областей, прилеглих до n-p-переходу, і область об'ємного заряду стає ширшою.

Вольт-амперні характеристики гетеропереходу SnS_2/CdTe при зворотному зміщенні $-I = f(-U)$ приведені на рис. 3.1 (в третьому квадранті). Відомо, що зворотній струм має дві складові: струм насичення і струм, який генерується в області об'ємного заряду (генераційний струм). Для напівпровідників з невеликою шириною забороненої зони, наприклад, в германію, друга складова мала, тому визначальну роль відіграє струм насичення. Але в напівпровідниках з більшою шириною забороненої зони (SnS_2 , CdTe) роль генераційного струму різко експоненційно зростає, тому в них не спостерігається насичення зворотного струму.

Генераційний струм пропорційний ширині області об'ємного заряду W . Тобто, чим більше W , тим ширше область, де кожний носій, що виникає за рахунок теплової генерації підхоплюється полем і дає внесок в струм, який протікає через діод. Оскільки величина W пропорційна $U^{1/2}$ (формула (3.5)),

то і зворотній струм пропорційний $U^{1/2}$ ($I_{зв} \sim U^{1/2}$), тобто спостерігається степенева залежність $I_{зв} \sim U^m$, де $m = 1/2$.

Швидкість генерації носіїв заряду в напівпровіднику залежить від концентрації і від енергетичного положення глибоких рівнів, які виникають завдяки структурним недосконалостям, дефектам і домішкам.

Щоб перевірити, чи підкоряються експериментальні темнові зворотні ВАХ степеневій залежності $I_{зв} \sim U^m$, побудували ці ВАХ в координатах $\lg I_{зв} = f(\lg U_{зв})$, які приведені на рис. 3.4.

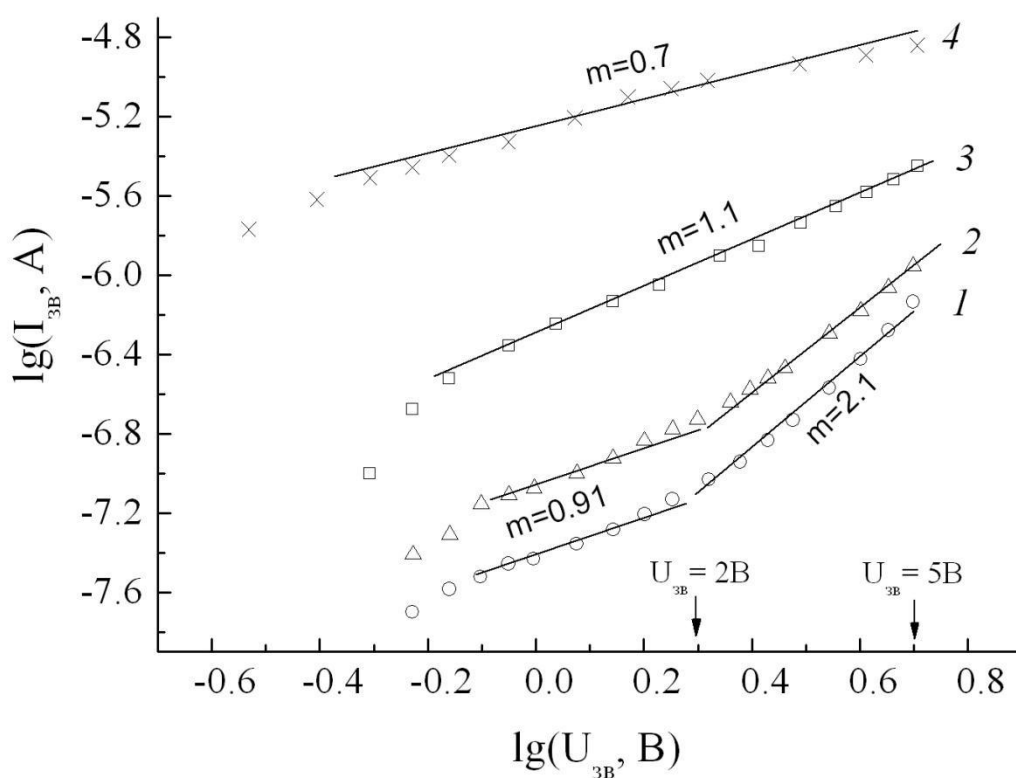


Рис. 3.4. Зворотні вольт-амперні характеристики гетеропереходу SnS_2/CdTe в логарифмічних координатах в залежності від температури T , К:

1 – 255.7, 2 – 268.6, 3 – 298.1, 4 – 330.2

На одержаних залежностях (рис. 3.4) можна виділити прямолінійні ділянки, які підтверджують степеневу залежність $I_{зв} \sim U^m$ в межах певних напруг. Нахил цих ділянок, який залежить від температури, визначає показник степені $m = \Delta U_{зв} / \Delta I_{зв}$. Одержані значення m приведені на рис. 3.4, звідки видно, що найбільш наближене значення m до $m = 1/2$ спостерігається при температурі $T = 330.2\text{K}$. При зменшенні температури до 298.1K , 268.6K і 255.7K m наближається до $m = 1$. При цьому для випадку найменших температур (268.6K і 255.7K) при $U_{зв} > 2$ В значення m стає рівним двом.

Отже, із одержаних результатів можна зробити висновок, що генераційна складова струму має місце у випадку $T = 330.2\text{ K}$ (крива 4); значення $m = 1$ свідчить про те, що при температурі 298.1K (крива 3) і при температурах 268.6K і 255.7K при $U_{зв} < 2$ В (криві 2 і 1) превалюють струми витоку, а в останньому випадку при $U_{зв} > 2$ В при 268.6K і 255.7K $m = 2$, що звичайно має місце при струмах обмежених просторовим зарядом (так званий квадратичний закон для ВАХ).

Треба відмітити, що струми витоку по периметру гетеропереходу є звичайним явищем. Поверхневі стани найбільш впливають на зворотні струми. Дефектність поверхні в області контакту може привести до утворення провідних шарів між зовнішніми виводами гетеропереходу. В зв'язку з тим, що зворотні струми малі, поверхневі витоки можуть бути суттєвими.

Висновки

1. Темнові вольт-амперні характеристики гетеропереходу n-SnS₂/p-CdTe є випрямляючими з коефіцієнтом випрямлення K , який змінюється від 1872 до 125 при зростанні температури від 255.7K до 330.2K.
2. Визначені діодні параметри: контактна різниця потенціалів $U_k = 0.27$ В, енергія активації послідовного опору $\Delta E = 0.35$ еВ, коефіцієнт η , який знаходиться в межах 3.9–3.0 (відповідно при температурах від 255.7K до 330.2K). Основною причиною більш високих значень η в порівнянні з теоретичною величиною $\eta = 2$ для випадку генераційно-рекомбінаційного механізму перенесення носіїв заряду через бар'єр пов'язано з впливом поверхневих дефектів на межі поділу в гетеропереході, які можуть спричинити процеси тунелювання носіїв заряду.
3. При зворотному зміщенні $U_{зв}$ зворотний струм $I_{зв}$ не насичується із-за домінування генераційної складової струму. Крім того, із зниженням температури $T < 300$ К з'являються струми витоку. Основною причиною

струмів витоку є наявність дефектних станів на поверхні, які сприяють утворенню провідних шарів між зовнішніми контактами гетеропереходу.

Техніка безпеки і охорона праці

1. Робота з електровимірювальними приладами та високою напругою

Електрика міцно увійшла в життя сучасної людини. Зараз важко собі уявити, як без неї обходилися люди ще якихось 200 років тому. В даний час ураження електричним струмом зі смертельним результатом становлять до 3% від загального числа нещасних випадків. Широке використання електричної енергії в усіх галузях промисловості і побуту обумовлює значну небезпеку ураження людини електричним струмом. Аналіз показує що кількість електротравм в промисловості становить 0,5-1%, проте, дуже високий відсоток летального результату - 15-20%, причому, до 80-85% електротравм зі смертельними наслідками відбувається в мережах з напругою до 1 000 В.

Згідно з вимогами ПТБ при огляді діючих електроустановок не дозволяється виконувати які-небудь роботи, а у разі виявлення аварійного стану електроустаткування необхідно його негайно відключити, повідомивши про це особу, відповідальну за електрогосподарство (начальник електроцеху, головний енергетик та ін.).

При огляді слід звернути особливу увагу на наявність і справність захисного заземлення(занулення) корпусів, каркасів, кожухів і т. п. Якщо при торканні рукою металевих нетоковедущих частин(наприклад, при визначенні міри

нагріву) відзначається дія електричного струму, що говорить про порушення ізоляції при несправній дії захисного заземлення, це устаткування слід негайно відключити.

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 гази, 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 гази (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.

2. Пожежна безпека

Будівлі і будівельні споруди складаються з конструктивних елементів, що мають різну вогнестійкість, т. е. здатністю протистояти дії пожежі.

Згідно СНиПП-А.5-98 будівель і споруди Класифікуються на п'ять мір вогнестійкості. Із зростанням міри межа вогнестійкості, вимірювана в

годиннику, зменшується і для елементів будівлі, що важко згорають, не перевищує 0,25 ч. Необхідна міра вогнестійкості будівлі нормується з урахуванням пожежної небезпеки розміщуваних в них виробничих процесів, а також кількості горючих речовин, що звертаються у виробництві.

Будівлі і споруди для промислових виробництв повинні мати певні межі вогнестійкості, тому спорудження їх повинне виконуватися з матеріалів, що не згорають. Стіни, що несуть, колони і стіни сходових клітин повинні мати межу вогнестійкості 2...3 ч, а міжповерхові і горищні перекриття - 1 ...1,5ч.

Протипожежні стіни(брандмауери) в промислових будівлях повинні споруджуватися з матеріалів(червона цеглина, залізобетон), що не згорають, з межею вогнестійкості не менше 4 ч.

Для підвищення вогнестійкості деталей, виготовлених з матеріалів(дерево, склопластики, пластмаси та ін.), що згорають, застосовують вогнезахисні покриття і просочувальні матеріали. Для просочення дерев'яних виробів застосовують солі фосфорнокислого і сірчанокислого амонію.

Будівлі виробничі, енергетичного, транспортного і складського господарства виконуються з силікатної цеглини або збірних елементів залізобетону. Стіни, колони і інші елементи будівель з червоної цеглини відрізняються міцністю і при температурі 900 С Зі знижують міцність до 15 %. Найбільшої деформації при пожежах піддаються сталеві конструкції, які при 500 -700 С практично нездатні нести навантаження і під власною вагою робляться непридатними.

Для кожного підприємства розробляються інструкції і правила внутрішнього розпорядку для дотримання протипожежного захисту.

1. Загальні вимоги

1.1. Усе електрообладнання (корпуси електричних машин, трансформаторів, апаратів, світильників, розподільчих щитів, щитів управління, металеві корпуси пересувних і переносних електроприймачів тощо) підлягає зануленню або заземленню відповідно до вимог розділів Правил улаштування електроустановок (ПУЕ).

1.2. На підприємстві слід встановити порядок відключення напруги з електрообладнання, силових та контрольних кабелів на випадок пожежі. При цьому електроживлення систем пожежної автоматики, протипожежного водопостачання та експлуатаційного (аварійного) освітлення не повинно відключатися.

1.3. В усіх приміщеннях, які після закінчення роботи замикаються і не контролюються черговим персоналом, з усіх електроустановок та електроприладів, а також з мереж їхнього живлення повинна бути відключена напруга (за винятком чергового освітлення, протипожежних та охоронних установок, а також електроустановок, які за вимогами технології працюють цілодобово). При цьому в будівлях усі електроустановки, які працюють цілодобово, повинні бути заживлені самостійними лініями, починаючи від увідного пристрою в будівлю. Кожна така електроустановка повинна мати свій апарат захисту (запобіжник або автоматичний вимикач). Вимкнення електропостачання повинно виконуватися від одного загального вимикача, до якого є вільний доступ електротехнічному персоналу та який розміщений біля виходу з будівлі.

2. Особливі вимоги

2.1. У приміщеннях категорій А, Б, В за вибухопожежною та пожежною небезпекою має бути забезпечено дотримання вимог електричної іскробезпеки згідно з ГОСТ 12.4.124-83 «ССБТ. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования», ГОСТ 12.1.018- 93 «ССБТ. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования» та Правилами захисту від статичної електрики.

2.2. Захист будівель, споруд та зовнішніх установок від прямих попадань блискавки і вторинних її проявів має виконуватися відповідно до вимог РД 34.21.122-87 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений».

2.3. Для підтримання пристроїв захисту від блискавок у справному стані необхідно регулярно проводити ревізію цих пристроїв: для будівель і споруд І

та II категорій з захисту від блискавки — щороку, для III категорії — не рідше 1 разу на 3 роки зі складанням акта, в якому вказуються виявлені дефекти. Усі виявлені у пристроях захисту від блискавок пошкодження та дефекти підлягають негайному усуненню.

2.4. Відстань від повітряних ліній електропередач до будівель і споруд, які містять вибухопожежонебезпечні та пожежонебезпечні приміщення, до вибухо- і пожежонебезпечних зон зовнішніх установок, а також горючих дахів та близьких частин будівель і споруд, які виступають, місць зберігання горючих матеріалів повинна відповідати величинам, визначеним ДНАОП 0.00-1.32-01.

2.5. Протипожежні відстані від повітряних ліній слабострумових мереж (радіо, телефонного зв'язку, сигналізації тощо) до зовнішніх установок з вибухопожежонебезпечними зонами всіх класів згідно з ДНАОП 0.00-1.32-01 мають бути такими самими, як і для повітряних ліній електропередач напругою до 1 кВ.

2.6. З'єднання, відгалуження та окінцювання жил проводів і кабелів мають здійснюватися за допомогою опресування, зварювання, паяння або затискачів (гвинтових, болтових тощо). Місця з'єднання жил проводів і кабелів, а також з'єднувальні та відгалужувальні затискачі повинні мати мінімальний перехідний опір, щоб уникнути їх перегрівання та пошкодження ізоляції стиків. Струм втрат ізоляції стиків повинен бути не більше струму втрат ізоляції цілих жил цих проводів і кабелів.

Список літератури

1. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2001, Т. 3. Кн.1. С. 880.
2. Абрикосов Н. Х., Банкина В. Ф., Порецкая Л. В. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе. М.: Наука, 1975, 220 с.
3. Тулеушев Ю. Ж., Володин В. Н., Мигунова А. А., Лисицын В. Н. Теллурид кадмия в пленках системы теллур-кадмий, сформированной ультрадисперсными частицами // ЖТФ, 2015, Т. 85, вып. 8, С. 67-71.
4. Савицкий А. В., Слипенюк Т. С., Ульяницкий К. С. Оптические свойства теллурида кадмия в области прозрачности // Ж. Изв. ВУЗов. Физика, 1980, №11, с. 101-103.
5. Савицкий А. В., Бурачек В. Р., Ульяницкий К. С., Кормыш М. Е. Влияние легирования некоторыми примесями на оптические свойства монокристаллов CdTe в области прозрачности // Ж. прикладной спектроскопии, 1986, Т.44, №3, с. 462-465.
6. Колтун М. М. Солнечные элементы. М.: Наука, 1987, 191 с.
7. Преобразование солнечной энергии / Под ред. Б. Серафина. М.: Энергоиздат, 1982, 319 с.
8. Шарма Б.Л., Пурахит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы. М.: Сов. радио, 1979, 227 с.
9. Васильев А. М., Ланцман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971, 246 с.

- 10.Ананьина Д.Б., Бакуменко В.Л., Бонаков А.К., Грушка Г.Г. О характеристиках гетероперехода $n\text{-SnS}_2/n\text{-Hg}_3\text{In}_2\text{Te}_6$, приготовленного методом посадки на оптический контакт // ФТП, 1980, Т.14, в.12, с. 2419-2422.