КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Житомир 2009

**1. Класифікація провідникових матеріалів (ПМ)**

В якості провідників електричного струму використовуються матеріали, в трьох основних станах:

твердому – метали та їх сплави;

рідинному – розплавлені при високій температурі метали (окрім ртуті, у якої температура плавлення –390С) та різноманітні електроліти;

газовому – при відповідних умовах іонізовані гази.

В свою чергу до металевих провідників можна віднести:

метали високої провідності (ρ≤ 0,05 [мкОм∙м],

при t=200C). Застосування: виготовлення дротів, струмоведучих жил кабелів, обмоток електричних машин та трансформаторів, тощо.

сплави високого опору (ρ≥0,3 [мкОм∙м] при t=200C). Застосування: виготовлення резисторів, електронагрівальних приладів, ниток ламп розжарювання, тощо.

надпровідники та кріопровідники (характеризуються незначним питомим опором при дуже низьких температурах).

Проходження струму в металах (як в твердому, так і в рідинному станах) – обумовлено дрейфом вільних електронів під дією електричного поля. Тому, метали називають провідниками з електронною електропровідністю або провідниками першого роду.

Провідниками другого роду або електролітами є розчини кислот, лугів та солей. Проходження струму крізь такі речовини пов’язане з рухом іонів, які разом з переносом заряду переносять і саму речовину у відповідності до законів Фарадея, внаслідок цього склад електроліту поступово зменшується, а на електродах виділяються продукти електролізу.

Всі гази та пари, у тому числі і металів при низьких значеннях напруженості електричного поля (Е, [В/м]) не є провідниками. Однак, якщо напруженість електричного поля перевищить деяке критичне значення (Екр), це забезпечить виникнення ударної та фотонної іонізацій, при яких газ стає провідником з електронною та іонною електропровідністю.

Сильно іонізований газ, в якому число електронів дорівнює числу іонів в одиниці об’єму, являє собою особливе провідне середовище, яке називається – плазмою.

**2. Електропровідність металів**

Твердий металевий провідник являє собою систему з кристалічної іонної решітки в середині якої знаходиться електронний газ з вільних колективізованих електронів. У вільний стан, від кожного атома металу переходить від одного до двох електронів.

До електронного газу застосовувалися уявлення та закони статистики звичайних газів.

При вивченні хаотичного (теплового) та направленого (під дією сили електричного поля) руху електронів, був отриманий закон Ома:

де n0 – концентрація електронів; S – площа перерізу провідника; υсер – середня швидкість руху електронів під дією ЕП напруженістю Е; е – заряд електрону.

І=n0·S·υсер·е,

Розгляд питання зштовхування електронів з вузлами кристалічної решітки, коли енергія, яка накопичилася за рахунок прискорення електронів в електричному полі, передається металевій основі провідника, за рахунок чого він розігрівається, привело до виведення закону Джоуля – Ленца:

*Q = I2·R·t*.

Експериментальні дослідження підтвердили гіпотезу про електронний газ в металах, а саме:

при тривалому проходженні струму крізь коло, що складається з різних металевих провідників, атоми одного металу не переходять в інший;

при нагріванні металу до високих температур збільшується швидкість теплового руху вільних електронів, а деякі найбільш швидкі з них здатні вилітати з металу, переборюючи при цьому сили поверхневого потенціального бар’єру (термо-електронна емісія);

якщо зразок металу несподівано зупинити після швидкого руху, то за законом інерції, відбудеться зміщення електронного газу в напрямку руху, що в свою чергу призведе до виникнення різниці потенціалів на кінцях зупиненого провідника.

при дії поперечного магнітного поля на металевий провідник, в ньому виникає поперечна ЕРС та змінюється його електричний опір, що є наслідком викривлення траєкторії електронів в металевому провіднику.

Між класичною теорією термодинаміки та реальною залежністю властивостей електронного газу від температури існують протиріччя. Пояснення дає квантова механіка, яка твердить, що електронний газ в металах при звичайній температурі знаходиться в стані виродження. В цьому стані енергія електронного газу практично не залежить від температури, тобто тепловий рух практично не змінює енергію електронів. Тому на нагрівання електронного газу теплота не витрачається.

В стан, аналогічний звичайним газам, електронний газ переходить при температурах тисяч кельвінів [К].

Уявляючи метал, як систему, в якій позитивні іони скріплюються за рахунок електронів, що здатні вільно рухатися, легко зрозуміти природу основних властивостей металів: пластичність, ковкість, значні електричну та теплову провідність.

Рухаючись в металі, електрони мають корпускулярно – хвильову природу, а тому основними їх параметрами є не тільки маса (m), швидкість (v), енергія частки (W), але і частота та довжина хвилі:



де h – постійна Планка, h = 6,62 · 10 - 34 [Дж·с].

При звичайних температурах електрони в металах підпорядковуються статистиці Фермі – Дірака. Якщо в енергетичній зоні електронів менше ніж потрібно, щоб заповнити «заповнену зону», то вони займають рівні починаючи від «дна» зони знизу доверху.

Імовірність заповнення рівнів залежить від їх енергії і верхня межа заповнення стає розмитою. Криву розраховують за допомогою статистики Фермі:



якщо W = Wf то Р (W) = ,



де: W – енергія рівня, ймовірність заповнення якого визначається; Wf – енергія етапного рівня, на якому ймовірність заповнення дорівнює 0,5; k =1,38 • 10 –23[Дж/K] – постійна Больцмана. Ця енергія відповідає верхній межі електронного розподілення при Р= 0, Wf – називають рівнем Фермі. Відповідний йому потенціал: називається електрохімічним потенціалом.



**3. Властивості провідників**

До найважливіших параметрів, які характеризують властивості провідникових матеріалів відносяться:

1. Питома провідність та питомий опір провідника. Зв’язок щільності струму J ([А/м2]) та напруженості електричного поля Е ([В/м]) в провіднику пов’язані диференційною формою закону Ома:



де - це питома провідність провідника; величина ρ = 1/ – питомий опір провідника довжиною (l), з поперечним перерізом (S), у якого опір матеріалу (R).



.



Для вимірювання ρ провідникових матеріалів інколи користуються несистемною одиницею вимірювання або [мкОм·м]. Зв'язок між приведеними одиницями вимірювання має вигляд:



1 [Ом·м]=106[мкОм·м]=106 [Ом·мм2/м]

Значення ρ для провідників з металу знаходяться в межах: 0,016 [мкОм·м] (для срібла)÷10 [мкОм·м] (для залізохромоалюмінієвих сплавів).

Питома провідність металевих провідників згідно з класичною теорією металів може бути визначена за формулою:



де е – заряд електрона; n0 – число вільних електронів в одиниці об’єму; λ – середня довжина вільного пробігу електрона (відстань між вузлами решітки); μ – маса електрона; νт – середня швидкість теплового руху вільного електрона в металі.

При перетворенні останнього виразу на основі положень теорії квантової механіки, отримаємо:



де K – чисельний коефіцієнт.

Величини νт та n0 для всіх металів приблизно однакові, тому значення питомої провідності γ головним чином визначається довжиною вільного пробігу електрону λ, яка в свою чергу визначається структурою матеріалу. Всі чисті метали з найбільш правильною кристалічною решіткою мають найменший питомий опір (ρ); при наявності домішок, кристалічна решітка пошкоджується, що приводить до зростання питомого опору (ρ).

До такого ж висновку можна прийти, на підставі хвилевої природи електронів. Розсіювання електронних хвиль відбувається на дефектах кристалічної решітки, які співрозмірні з відстанню, що становить близько чверті довжини електронної хвилі. Порушення менших розмірів не викликають помітного розсіювання хвиль. В металевих провідниках, де довжина хвилі електрона близько 0,5 [нм], мікродефекти створюють значну відстань, яка зменшує рухливість електронів, і відповідно, приводить до зростання питомого опору матеріалу(ρ).

Температурний коефіцієнт питомого опору металів

З ростом температури кількість вільних носіїв заряду в металевому провіднику залишається практично незмінною, але підсилюються коливання вузлів кристалічної решітки, що впливає на зменшення середньої довжини вільного пробігу електрону (λ) (кількість перешкод на шляху направленого вільного руху електронів зростає), як наслідок зменшується рухливість електронів, а це у свою чергу призводить до збільшення питомого опору металу (ρ).

ТКρ =



Таким чином ТКρ – температурний коефіцієнт питомого опору металів має позитивне значення.

Згідно з висновками електронної теорії металів αρ чистих металів має дорівнювати температурному коефіцієнту розширення ідеальних газів, тобто 1/273=0,0037 [K-1] (виключення: феромагнітні метали – залізо, нікель, кобальт, хром).

При зміні температури у вузьких діапазонах можна для розрахунків застосовувати кусочно-лінійну апроксимацію.

,



де - середній температурний коефіцієнт питомого



опору даного матеріалу в діапазоні температур Т1 ÷ Т2, причому Т2 > Т1.

Теплопровідність металів

Передачу тепла через метал забезпечують ті ж самі вільні електрони, які визначають його електропровідність. Число електронів в одиниці об’єму металу є дуже великим, а тому коефіцієнт теплопровідності (γт) металів є значно більшим за коефіцієнт теплопровідності діелектриків.

При підвищенні температури, коли рухливість електронів в металі, а відповідно і його електропровідність зменшуються, відношення коефіцієнта теплопровідності металу (γт) до його питомої провідності (γ) зростає (γт/γ)↑. Математично це виражається законом Відемана – Франца – Лоренца:

γт / γ = L0 · T,

де Т – термодинамічна температура [К], L0 – число Лоренца: ,



де: k =1,38 • 10 –23[Дж/K] – постійна Больцмана;

e =1,6 • 10 –19[Кл] – заряд електрона.

Можна отримати: L0 = 2,45 • 10 –8 [B2/K2].

Даний закон виконується (в області температур, близьких до нормальної або підвищених), за винятком марганцю та берилію, для більшості металів. В області низьких температур відношення (γт/γ) вже не залишається незмінним. Якість та характер механічної обробки металу може значно впливати на теплопровідність матеріалу провідника.

Термоелектрорушійна сила.

При торканні двох різних металевих провідників між ними виникає контактна різниця потенціалу. Причиною її виникнення є різниця в роботі виходу електронів з різних металів, а також різниця в концентрації вільних електронів в різних металах. (різниця тиску електронного газу в різних металах).

**T1**

**B**

**T2**

**A**

З електронної теорії металів виходить, що контактна різниця потенціалів між металами А та В становить:



де: UB таUA – потенціали металів, які торкаються один одного; n oА n oВ – концентрація електронів в металах А та В;

k – постійна Больцмана; е – заряд електрона.

Якщо температура «зпаїв» однакова, то сума різниці потенціалів в замкнутому колі дорівнює нулю. Якщо «зпаї» мають різну температуру Т1 та Т2 то між ними виникає термоелектрорушійна сила (термо-е.р.с.).



або U = ψ (T1 – T2), де ψ – стала для даної пари провідників – коефіцієнт термо-е.р.с.

Термо-е.р.с. – пропорційна різниці температур зпаїв. Термопари використовують для вимірювання температури, при цьому використовуються провідники, які мають високий та стабільний коефіцієнт термо-е.р.с.

Навпаки, обмотки вимірювальних приладів та резисторів виконують з провідників з якомога меншим коефіцієнтом термо-е.р.с.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення провідників

Цей коефіцієнт визначається за відомою вже формулою:



Він є необхідним для аналізу роботи різних спряжених матеріалів у тій або іншій конструкції (порушення герметичності та погіршення якості з’єднання провідників з напівпровідниками та діелектриками). Він також є необхідним для розрахунку температурного коефіцієнта електричного опору дроту.

ТКR = αR =αρ – αl

Для чистих металів αl << α ρ і для них αR ≈ α ρ, однак для сплавів формула має практичне значення. Значення αl металів зростає при підвищенні температури і наближенні її до температури плавлення. Як правило, при нормальній температурі легкоплавкі метали мають відносно високі значення αl, а тугоплавкі – відносно низькі.

Механічні властивості провідників характеризують:

міцністю при розтягуванні σр;

відносним подовженням перед розривом ∆ℓ/ℓ;

крихкістю;

твердістю.

Механічні властивості металевих провідників в

більшій степені залежать від механічної та термічної їх обробки, від наявності в них домішок тощо. Вплив відпалювання приводить до суттєвого зменшення σр та зростання ∆ℓ/ℓ.

Прості матеріали високої провідності та їх сплави

До матеріалів високої провідності відносяться мідь, алюміній, срібло, золото, платина, з них найбільш розповсюдженими в радіоелектронній та електротехнічній апаратурі є мідь та алюміній.

Мідь: метал жовто-червоного кольору.

Переваги міді:

Найменший, після срібла, питомий опір, ρ = 0,017 [мк Ом ּм];

достатньо висока механічна міцність;

задовільна стійкість до корозії (інтенсивне окислення відбувається тільки при підвищених температурах);

висока технологічність в обробці (з міді прокатуються листи, стрічки і протягуються дроти товщиною долів міліметра);

відносна легкість пайки та зварювання.

Отримання міді: здійснюється шляхом переробки сульфідних руд. Після декількох плавок руди та відпалювань з інтенсивним обдуванням, мідь очищують електролітичним шляхом. Отримані при цьому катодні пластини переплавляють в заготовки масою 80–90 [кг], які прокатують та протягують до необхідного поперечного перерізу. Для виготовлення дроту, спочатку шляхом гарячого прокатування, виготовляють «катанку» діаметром 6,5÷7,2 [мм], яку протравлюють в слабкому розчині сірчаної кислоти для зняття з її поверхні оксиду міді СuO, що виникає при нагріванні, а потім протягують без підігріву в проволоку потрібного діаметру до 0,03÷0,02 [мм].

Марки міді:

В якості провідникового матеріалу використовують мідь марок М1 та М0.

Склад міді:

марки М0 – 99,95% міді (Cu), 0,05% домішок, в яких кисень не повинен перевищувати 0,02%;

марки М1 – 99,9% міді (Cu), 0,1% домішок, в яких кисень не повинен перевищувати 0,08%. Присутність кисню погіршує механічні властивості міді.

При холодному протягуванні отримують тверду мідь (МТ), яка має високу межу міцності при розтягуванні, мале подовження перед розривом, твердість та пружність при вигинанні. Дріт з твердої міді здатний пружинити.

При випалюванні міді (здійснюється її підігрів до декількох сотень градусів з наступним охолодженням) отримують м’яку мідь (ММ). Відпалювання міді виконують в спеціальних печах без доступу повітря, з метою уникнення процесу окислення. М’яка мідь характеризується пластичністю, малими твердістю та міцністю, але для неї є характерним велике подовження перед розривом та більш високу питому провідність.

Сплави міді з оловом, кремнієм, фосфором, берилієм, хромом, магнієм, кадмієм – називаються бронзами. Бронзи мають більш кращі механічні властивості ніж чиста мідь. Бронзу використовують для створення пружинних контактів. Введення в мідь кадмію значно підвищує її міцність та твердість, при незначному зменшенні питомої провідності. Кадмієву бронзу використовують для виготовлення колекторних пластин. Ще більшою міцністю володіє берилієва бронза.

Сплав міді з цинком носить назву латуні, яка характеризується достатньо високим відносним подовженням при підвищеній, у порівнянні з чистою міддю, межі міцності при розтягуванні. Деталі з латуні, більш краще ніж з міді штампуються та витягуються.

Алюміній – другий за значенням після міді провідниковий матеріал. Відноситься до легких металів (питома щільність алюмінію становить 2,6 [Мг/м3], а прокатаного 2,7 [Мг/м3]). Алюміній в 3,5 рази легший ніж мідь. Температурний коефіцієнт розширення, питома теплоємність та теплота плавлення алюмінію більші ніж у міді, а температура плавлення навпаки менше. Алюміній має нижчі в порівнянні з міддю механічні та електричні характеристики. Його питомий опір ρ=0,028 [мкОм·м] в 1,63 рази більший ніж у міді ρ=0,0172 [мкОм·м]. Тому поперечний переріз дроту з алюмінію повинен бути в 1,63 рази більший, ніж у дроту з міді, для забезпечення однакового з ним електричного опору, тобто діаметр алюмінієвого дроту повинен бути в рази більший ніж у мідного. Тому якщо в конструкції існують габаритні обмеження, краще застосовувати мідний дріт. Однак при однакових довжині та електричному опорі алюмінієвий дріт в 2 рази легший за мідний. Тому для виготовлення дротів однієї і тієї ж провідності при даній довжині, алюміній буде вигідніше міді в тому випадку, якщо тонна алюмінію дорожче тонни міді не більше ніж у два рази. Алюміній менш дефіцитний за мідь.



В електротехніці використовують алюміній марки А1, що містить ≤ 5% домішок. Для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів та корпусів оксидних конденсаторів, використовують алюміній марки АВОО кількість домішок в якому ≤0,03%. Алюміній марки АВОООО містить домішок ≤ 0,004%. Наявність домішок зменшує питому електричну провідність алюмінію. Прокатування, протягування та відпалювання алюмінію аналогічні операціям над міддю. З алюмінію є можливість, прокатуванням, отримати фольгу товщиною 6÷7 [мкм], яка використовується в якості електродів паперових та плівкових конденсаторів.

Алюміній активно окислюється, вкриваючись тонкою оксидною плівкою, з великим електричним опором. Ця плівка захищає алюміній від подальшої корозії, але створює великий перехідний опір в місцях контакту алюмінієвих дротів і унеможливлює пайку алюмінію звичайними методами. Для пайки алюмінію використовують спеціальні пасти – припої або ультразвукові паяльники. В місці з’єднання алюмінію та міді виникає гальванічна корозія. У разі зіткнення місця контакту з вологою, виникає місцева гальванічна пара з доволі високим значенням ЕРС, причому полярність цієї пари є такою, що на зовнішній поверхні контакту струм протікає від алюмінію до міді, в результаті чого алюміній піддається значній корозії. Тому місця з’єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні бути якісно захищені від вологи.

Алюмінієві сплави – мають підвищену механічну міцність.

Альдрей: 0,3÷0,5% магнію (Мg), 0,4÷0,7% кремнію (Si), 0,2÷0,3% заліза (Fe), решта алюміній (Аl). Високі механічні якості альдрей отримує після особливої обробки (закалювання катанки – охолодження у воді при температурі 510÷5500С, волочіння та витримка при температурі близько 150 0С). В альдреї утворюються з’єднання Мg2Si, яке забезпечує високі механічні властивості сплаву. У вигляді дроту альдрей має:

щільність – 2,7 [Мг/м3];

межу міцності при розтягуванні – σρ = 350 [Мпа];

відносне подовження перед розривом – ∆ℓ/ℓ=6,5%;

температурний коефіцієнт лінійного розширення провідника – αL=23·10–6 [K –1];

питомий опір – ρ = 0,0317 [мк Ом ·м];

температурний коефіцієнт питомого опору – αρ= 0,0036 [K –1].

Альдрей є легшим за алюміній та близьким до нього за питомим опором, при цьому за механічними властивостями він більш наближений до твердотягнутої міді.

Сталеалюмінієвий дріт – широко використовується в електротехніці для побудови ліній електропередач. Це скручений стальний дріт з алюмінієвими жилами. Механічні властивості забезпечує сталь, а електричні алюміній. В цьому дроті, при високих напругах, небезпека виникнення коронного розряду є меншою ніж у мідному, завдяки меншій величині напруженості електричного поля на його поверхні, яка визначається більшим зовнішнім діаметром.

Залізо (сталь) – найбільш дешевий та доступний провідний матеріал, з високою механічною міцністю, однак навіть чисте залізо у порівнянні з міддю та алюмінієм характеризується великим питомим опором ρ = 0,1 [мкОм ·м]. У сталі за рахунок вуглецю опір є ще більшим. У якості провідникового матеріалу, як правило застосовують м’яку сталь із вмістом вуглецю 0,1÷0,15%. Для неї є характерними наступні параметри:

межа міцності при розтягуванні – σρ=700÷750 [Мпа];

відносне подовження перед розривом – ∆ℓ/ℓ=5÷8%;

питома провідність (γ) в 6–7 разів менша ніж у міді.

Сталь використовують для виготовлення проводів повітряних ліній, з метою передачі невеликих потужностей. При малій силі струму, товщина визначається не його опором, а механічною стійкістю. Сталь не стійка до корозії тому її покривають цинком. Залізо має високий температурний коефіцієнт питомого ТКρ тому тонку проволоку розміщують в балоні з воднем від окислення і використовують для стабілізації струму (Баретер). Крім того залізо використовують для виготовлення токоведучих рельсів.