

Провідникові матеріали і вироби з них

1. Класифікація провідникових матеріалів

Провідникові матеріали — це речовини, основною властивістю яких є електропровідність. Вона характеризується незначним або заданим питомим електричним опором ρ . До них відносяться і матеріали з високим опором, і надпровідникові, і кріопровідникові матеріали, у яких питомий електричний опір при дуже низьких температурах надто малий.

Найважливішими провідниковими матеріалами, що використовуються в техніці, є метали та їх сплави. Значно менше використовують рідкі і газоподібні провідникові матеріали.

До *газоподібних* провідникових матеріалів відносять всі гази та пари, а також пари металів. При достатньо малих значеннях напруженості електричного поля вони є діелектриками і мають дуже високий питомий електричний опір.

До *рідких* провідників відносять розплави металів і розчини (зокрема, водяні), а також розплави солей, кислот та інших речовин з іонною будовою молекул.

До *твердих* провідників відносять метали та сплави. В твердому стані метали мають кристалічну структуру, для якої властивий особливий вид металічного зв'язку між атомами. При протіканні електричного струму крізь контакт різних металів речовини одного металу не переносяться в інший, як це має місце при протіканні струму в електролітах, оскільки перенесення електричних зарядів у металах здійснюється тільки електронами.

За характером використання в радіоелектронних приладах металеві матеріали поділяють на матеріали з *високою провідністю* (питомий електричний опір $\rho \leq 0,1$ мкОм м) і матеріали з *високим опором* (питомий електричний опір $\rho \geq 0,3$ мкОм м).

Матеріали з високою провідністю використовують як основу в контактних матеріалах і припоях, для виготовлення проводів, мікропроводів, провідникових покриттів і плівок, різних струмопровідних деталей. До них відносять мідь, алюміній, залізо, срібло, золото, олово, свинець, цинк та ін.

Матеріали з високим опором використовують для виготовлення резистивних матеріалів та матеріалів для термопар. Широко застосовуються сплави з високим опором: мідно-марганцеві (манганіни), мідно-нікелеві (константани), сплави заліза, нікелю та хрому (ніхром), хромоалюмінієві сплави, фехралі та хромалі.

Матеріали з мізерно малим питомим електричним опором ρ , який вони мають за дуже низьких температур, називаються *надпровідниками*. Властивості надпровідників мають ртуть, алюміній, свинець, ніобій, сплави ніобію з оловом, титаном та ін.

2. Властивості провідникових матеріалів

Тверді металеві провідники характеризуються високою електро- та теплопровідністю, що обумовлено особливостями металічного зв'язку між атомами. Як провідники використовують також неметалеві матеріали (вугілля, графіт, вугільно-графітові композиції, високоіонізовані гази). Провідникові матеріали мають механічні, фізико-хімічні та технологічні властивості.

До механічних властивостей відносять твердість, в'язкість, пружність, пластичність, лінійне розширення, крихкість, міцність, втому.

Твердість — це здатність металу чинити опір пластичній деформації або крихкому руйнуванню в поверхневому шарі при місцевій контактній силовій дії.

Існують різні методи визначення твердості: втискування, подряпання, пружна віддача. Найпоширенішим методом є втискування в метал сталеві кульки (твердість за Брінеллем), втискування конуса (за Роквеллом), втискування піраміди (за Віккерсом).

Випробовування матеріалів на твердість втискуванням кульки за методом Брінелля виконують за допомогою сталеві загартовані кульки діаметром 10,5 або 2,5 мм у випробовуваний матеріал під дією навантаження протягом певного часу (рис. 3.1). Діаметр кульки, навантаження і час витримування під навантаженням вибирають за спеціальними таблицями залежно від товщини і твердості матеріалу.

Перед випробовуванням поверхню деталі або зразка зачищають напилком або наждачним кругом.

Після випробовування діаметр відбитка вимірюють за допомогою градуйованого збільшувального скла у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Твердість матеріалу за методом Роквелла визначають за глибиною втискування у випробовуваний матеріал сталеві кульки діаметром 1.59 мм під навантаженням 100 кг або алмазного конуса з кутом при вершині 120° при навантаженнях 60 і 150 кг на твердомірах.

Твердість за методом Віккерса визначають втискуванням у випробовуваний матеріал алмазної піраміди з кутом при вершині 136° під навантаженням. В результаті на поверхні зразка залишається квадратний відбиток, довжина діагоналі якого характеризує твердість матеріалу. Чим більша діагональ, тим менша твердість. Діагоналі вимірюють за допомогою мікроскопа. Твердість за методом Віккерса НУ визначають за таблицями залежно від довжини діагоналей відбитка.

Пружність — це властивість матеріалу поновлювати свою форму та об'єм після зняття дії зовнішніх сил, які викликають їх зміну.

В'язкість — це здатність матеріалу поглинати механічну енергію і при цьому проявляти значну пластичність аж до руйнування. В'язкість оцінюють за допомогою приладу, який називається маятниковим копром.

Ударна в'язкість — це здатність матеріалу чинити опір ударним навантаженням. За цією характеристикою оцінюють опір матеріалу проти крихкого руйнування.

Пластичність — це властивість матеріалу деформуватися без руйнування під впливом зовнішніх сил та зберігати нову форму після зняття дії цих сил.

Відносним видовженням називають відношення абсолютного видовження зразка до його початкової розрахункової довжини, що визначена у відсотках.

Відносним звуженням називають відношення абсолютного звуження площі поперечного перерізу зразка після розриву до його початкової площі поперечного перерізу, визначену у відсотках

Крихкість — це здатність матеріалів руйнуватися при прикладанні різкого динамічного зусилля. До крихких матеріалів відносять скло, кераміку, порцеляну, хром, марганець, кобальт, вольфрам та ін.

Міцність — це здатність матеріалу чинити опір дії зовнішніх сил без руйнування. Залежно від характеру дії зовнішніх сил розрізняють міцність на розтягування, стиснення, згин, кручення, повзучість і втому.

Питома міцність — це відношення границі міцності матеріалу до його щільності. Наприклад, питома міцність алюмінієвих сплавів, титану вища ніж сталі.

Втома — це руйнування матеріалу під дією невеликих повторних або знакозмінних навантажень (вібрацій).

Витривалість — це властивість металу витримувати, без руйнування, велику кількість повторних або знакозмінних напружень.

Випробовування на витривалість виконують на спеціальних машинах, де зразки обертаються з одночасним прикладанням згинальних навантажень, які створюють розтягування та стискування.

Повзучість — це здатність матеріалу до повільної і безперервної пластичної деформації при дії постійного навантаження або напруження.

До фізико-хімічних властивостей напівпровідникових матеріалів відносять електропровідність, коефіцієнт термоЕРС, теплопровідність, температуру плавлення, корозійну стійкість та ін.

Фізико-хімічні властивості оцінюють питомим електричним опором ρ , питомою електричною провідністю γ , температурним коефіцієнтом питомого електричного опору ТК ρ та коефіцієнтом електропровідності.

До *технологічних* властивостей відносять ковкість, зварюваність, обробку різанням, рідко текучість, усадку та ін. Технологічні властивості визначаються комплексом фізико-хімічних властивостей матеріалу.

Матеріали з високою провідністю

До цих матеріалів належать: метали – срібло Ag, медь Cu, алюміній Al, свинець Pb, олово Sn, та сплави – латунь, бронза, сталь, а також графіт.

Срібло Ag – білий, блискучий матеріал, стійкий проти окислення при нормальній температурі. Срібло має серед металів найнижчий опір $\rho = 0,016$ мкОм . м.. Густина його

10,5 г/см^2 , а температура плавлення 960°C . Зі срібла виготовляють слабо точні контакти та обкладки змінних конденсаторів. Їм покривають внутрішні частини хвилеводів для отримання кулі високої провідності.

Мідь Cu. Її властивості залежать від способу термічної обробки. Тверда мідь (без термообробки) має велику міцність та великий питомий опір, м'яка мідь (після термообробки) має меншу міцність. Її густина $8,9 \text{ г/см}^2$, а температура плавлення 1083°C , питомий опір $\rho = 0,017241 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Технічна мідь може бути твердою (маркується МТ) та м'якою (ММ). Властивості м'якої та твердої мідної проволочки наведені у таблиці 1.

Мідь застосовується для електричних проводів, плат друкованого монтажу тощо.

Алюміній Al. Займає третє місце серед провідникових матеріалів по опору $\rho = 0,286 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Густина його $2,7 \text{ г/см}^2$, а температура плавлення 660°C . М'який та легкий метал. З алюмінію виготовляють електричні проводи, фольгу, конденсаторну фольгу, екрани котушок індуктивності і т. ін. Його сплави – дюралюміній, силумін – твердіші за алюміній і застосовуються як конструкційний матеріал. Алюміній випускається двох типів – твердий (АТ) та м'який. Властивості м'якої та твердої алюмінієвої проволочки наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.

Властивості	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Межа міцності при розтяжінні (не менше), Н/м^2	$(36 - 39) \cdot 10^7$	$(26 - 28) \cdot 10^7$	$(16 - 17) \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^7$
Відносне подовження перед розривом (не менше), %	0,5 – 2,5	18 – 35	1,5 – 2	10 – 18
Питомий опір (не більше), $\text{мкОм} \cdot \text{м}$	0,0179 – 0,0182	0,01754	0,0295	0,0286

Золото Au – метал жовтого кольору, який має температуру плавлення 1063°C , густину $19,3 \text{ г/см}^2$, питомий опір $\rho = 0,024 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Золото використовується як контактний матеріал, матеріал для корозійно-стійких покриттів резонаторів, внутрішніх частин хвильоводів, електродів фотоелементів, захисних покриттів та провідників струму в інтегральних мікросхемах.

Олово Sn. Має найнижчу температуру плавлення ($T_{пл} = 230^\circ\text{C}$). Входить до складу припоїв, що застосовуються для спаювання проводів та деталей.

Латунь. Це сплав міді *Cu*, цинку *Zn*, свинцю *Pb*. Латунь м'якша за медь. З неї виготовляють осі, контакти, монтажні „лепестки”, болти та гайки, виводи резисторів, конденсаторів, транзисторів тощо.

Бронза. Їє сплав міді *Cu*, олова *Sn*, марганцю *Mn*, фосфору *P*, берилію *Be*, нікелю *Ni* та інших металів. У цьому сплаві міді більше ніж у латуні. Вона відрізняється великою твердістю.

Особливо тверді такі сплави:

- фосфориста бронза (Cu, 6 - 7% Sn 0,5% P);
- олов'яниста бронза (Cu, 10% Sn);
- алюмінієва бронза (Cu, 6...8% Al);
- берилієва бронза (Cu, 2% Be; 0,5% Ni).

Застосовується для виготовлення контактів, які ковзають та пружинять струмопровідні пружини, наприклад у реле.

Сталь. Це сплав залізу та вуглецю. Має високу механічну міцність, але сильно піддається корозії (іржавінню). Для захисту від корозії поверхню виробів із сталі покривають захисним покриттям з іншого металу (нікелювання, цинкування, кадміювання). Зі сталі виготовляють гвинти, гайки, осі, втулки, шпильки, шасі, каркаси, стійки.

Графіт – для щіток колекторів електричних машин.

Найпоширенішими матеріалами високої провідності слід віднести мідь і алюміній.

Мідь

Переваги міді, що забезпечують їй широке застосування в якості провідникового матеріалу, такі:

1. малий питомий опір;
2. досить висока механічна міцність;
3. задовільна в більшості випадків застосування стійкість по відношенню до корозії;
4. добре обробляється: мідь прокочується в листи, стрічки і простягається в дріт, товщина якої може бути доведена до тисячних часток міліметра;
5. відносна легкість пайки та зварювання.

Мідь отримують найчастіше шляхом переробки сульфідних руд. Після ряду плавок руди та відпалу з інтенсивним дуттям мідь, призначена для електротехнічних цілей, обов'язково проходить процес електролітичного очищення.

В якості провідникового матеріалу найчастіше використовується мідь марок М1 та М0. Мідь марки М1 містить 99.9% Cu, а в загальній кількості домішок (0.1%) кисню має бути не більше 0,08%. Присутність в міді кисню погіршує її механічні властивості. Кращими механічними властивостями володіє мідь марки М0, в якій міститься не більше 0.05% домішок, в тому числі не більше 0.02% кисню.

Мідь є порівняно дорогим і дефіцитним матеріалом, тому вона все ширше замінюється іншими металами, особливо алюмінієм.

В окремих випадках застосовуються сплави міді з оловом, кремнієм, фосфором, берилієм, хромом, магнієм, кадмієм. Такі сплави, що носять назву бронз, при правильно підбраному складі мають значно більш високі механічні властивості, ніж чиста мідь.

Алюміній

Алюміній є другим за значенням після міді провідникові матеріалом. Це найважливіший представник так званих легких металів: щільність литого алюмінію близько 2.6, а прокатанного - 2.7 Мг / м³. Алюміній приблизно в 3.5 рази легше міді. Температурний коефіцієнт розширення, питома теплоємність і теплота плавлення алюмінію більше, ніж міді. Внаслідок високих значень питомої теплоємності і теплоти плавлення для нагріву алюмінію до температури плавлення і перекладу в розплавлений стан потрібна велика витрата тепла, ніж для нагріву і розплавлення такої ж кількості міді, хоча температура плавлення алюмінію нижче, ніж міді.

Алюміній володіє зниженими в порівнянні з міддю властивостями - як механічними, так і електричними. При однаковому перетині і довжині електричний опір алюмінієвого дроту в 1.63 рази більше, ніж мідного. Вельми важливо, що алюміній менш дефіцитний, ніж мідь.

Для електротехнічних цілей використовують алюміній, який містить не більше 0.5% домішок, марки А1. Ще більш чистий алюміній марки АВ00 (не більше 0.03% домішок) застосовують для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів і корпусів електролітичних конденсаторів. Алюміній найвищої чистоти АВ0000 має вміст домішок не більше 0.004%. Додатки Ni, Si, Zn або Fe при утриманні їх 0.5% знижують ? відпаленого алюмінію не більше, ніж на 2-3%. Більш помітний вплив чинять домішки Cu, Ag і Mg, при тій же масовій зміні знижують ? алюмінію на 5-10%. Дуже сильно знижують електропровідність алюмінію Ti і Mn.

Алюміній дуже активно окислюється і покривається тонкою оксидною плівкою з великим електричним опором. Ця плівка оберігає метал від подальшої корозії.

Алюмінієві сплави мають підвищену механічну міцність. Прикладом такого сплаву є **альдрей**, що містить 0.3-0.5% Mg, 0.4-0.7% Si і 0.2-0.3% Fe. У альдрей утворюється з'єднання Mg₂Si, яке повідомляє високі механічні властивості сплаву.

Залізо

Залізо (сталь) як найбільш дешевий і доступний метал, що володіє до того ж високу механічну міцність, представляє великий інтерес для використання в якості провідникового матеріалу. Однак навіть чисте залізо має значно вищу порівняно з міддю і алюмінієм питомий опір; ? стали, т. е. заліза з домішкою вуглецю та інших елементів, ще вище. Звичайна сталь має малу стійкість до корозії: навіть при нормальній температурі, особливо в умовах підвищеної вологості, вона швидко іржавіє; при підвищенні температури швидкість корозії різко зростає. Тому поверхню сталевих дротів повинна бути захищена шаром більш стійкого матеріалу. Зазвичай для цієї мети застосовують покриття цинком.

У ряді випадків для зменшення витрати кольорових металів застосовують так званий **біметал**. Це сталь, покрита зовні шаром міді, причому обидва метали з'єднані один з одним міцно і безперервно.

Натрій

Дуже перспективним провідниковим матеріалом є металевий натрій. Натрій може бути отриманий електролізом розплавленого хлористого натрію NaCl в практично необмежених кількостях. З порівняння властивостей натрію з властивостями інших провідникових металів видно, що питомий опір натрію приблизно в 2.8 рази більше ? міді і в 1.7 разів більше ? алюмінію, але завдяки надзвичайно малої щільності натрію (щільність його майже в 9 разів менше щільності міді), провід з натрію при даній провідності на одиницю довжини повинен бути значно легше, ніж провід з будь-якого іншого металу. Однак натрій надзвичайно активний хімічно (він інтенсивно окислюється на повітрі, бурхливо реагує з водою), чому натрієвий провід повинен бути захищений герметизуючої оболонкою. Оболонка повинна надавати проводу необхідну механічну міцність, так як натрій вельми м'який і має малий межа міцності при деформаціях.

Матеріали з високою провідністю

До найпоширеніших матеріалів із високою провідністю відносять мідь, алюміній та його сплави. Технічні параметри цих матеріалів практично задовольняють усі експлуатаційні і виробничо-технологічні вимоги, що ставляться до виробів, які з них виготовляють.

Мідь та її сплави

Мідь Си — це в'язкий метал рожево-червоного кольору є одним з найпоширеніших матеріалів з високою провідністю. Основні властивості міді, що забезпечують її високе використання, такі:

малий питомий електричний опір (із всіх металів тільки срібло має питомий електричний опір на декілька відсотків менший, ніж у міді); висока механічна міцність;

задовільна корозійна стійкість (навіть в умовах високої вологості повітря мідь окиснюється значно повільніше, ніж, наприклад, залізо; інтенсивне окиснення міді виникає тільки за високих температур);

добре піддається паянню та зварюванню; добра оброблюваність (мідь прокатується в листи та стрічки і протягується у дріт).

Як провідниковий матеріал використовується мідь марок М1 (99,9% міді і не більше 0,1 % домішок) та М0 (домішок не більше 0,05%). Ще більш чистим провідниковим металом (не більше 0,01% домішок) є вакуумна мідь марки МВ, яка виплавляється у вакуумних індукційних печах.

Холодним протягуванням отримують тверду (твердотягнену) мідь (МТ), яка має високу границю міцності при розтягуванні, твердість та пружність (при згинанні дроту з твердої міді він трохи пружинить).

Тверду мідь застосовують у тих випадках, коли необхідно забезпечити високу механічну міцність, твердість та опірність стиранню: для контактних проводів, шин розподільних пристроїв, для колекторних пластин електричних машин, виготовлення хвилеводів, екранів, струмопровідних жил кабелів та проводів діаметром до 0,2 мм.

Після відпалу до декількох сотень градусів (мідь рекристалізується при температурі приблизно 270°C) з подальшим охолодженням отримують м'яку (відпалену) мідь (ММ). М'яка мідь має провідність на 3...5% вище, ніж тверда мідь.

М'яку відпалену мідь використовують як електротехнічний стандарт, по відношенню до якого питому електричну провідність металів та сплавів виражають при температурі навколишнього середовища 20°C.

М'яка мідь широко застосовується для виготовлення фольги та струмопровідних жил круглого та прямокутного перерізу в кабелях та обмоткових проводах, де важлива гнучкість та пластичність (відсутність «пружинення» при згині), а міцність не має великого значення.

Із спеціальних електровакуумних сортів міді виготовляють аноди потужних генераторних ламп, деталі надвисокочастотних пристроїв: магнетронів, клістронів, деяких типів хвилеводів та ін.

У випадках, коли ставляться вимоги до провідникового матеріалу не тільки високої провідності, але й підвищеної механічної міцності, корозійної стійкості та опірності стиранню, використовують сплави міді з незначним вмістом легуючих домішок.

Бронзи — це сплави міді з домішками олова, фосфору цинку, свинцю, нікелю, алюмінію, марганцю, заліза, берилію, титану кремнію. У складі бронзи цинк не є основним легуючим елементом і міститься в дуже невеликій кількості. Щодо електропровідності бронзи поступаються міді, але переважають її за міцністю пружністю, опірністю проти стирання і стійкістю проти корозії. Залежно від технічного використання бронзи поділяються на ливарні і деформувальні. З ливарних бронз методом лиття виготовляється різні деталі. Деформувальні бронзи використовують для виготовлення різних профілів методом обробки тиском (прокату, штамповка, кування).

Бронзи легко обробляються різанням і з'єднуються пайкою. Для зміцнення бронзові деталі термообробляють, загартовують, а потім відпускають при номінальних температурах.

Бронзи маркують буквами Бр (бронза), після яких проставляють букви, що означають вид та кількість легуючих добавок. Наприклад, берилієва бронза Бр.В2 (2 % берилію Ве, решта мідь Си; фосфориста бронза Бр.ОФ 6,5-0,15 (6,5 % олова, 0,15 % фосфору решта мідь).

Латуні — це мідні сплави, в яких основним легуючим елементом є цинк (до 43%).

Латуні, як і бронзи поділяються на ливарні і оброблювальні тиском. Більшість латуней добре з'єднуються паянням, електричним і газовим зварюванням.

Латуні значно міцніші та пластичніші міді і мають досить високе відносне видовження перед розривом. Вони дешевші міді, оскільки цинк, що входить до їх складу, має меншу вартість ніж мідь. У деяких випадках для підвищення корозійної стійкості до складу сплаву в невеликій кількості вводять алюміній, нікель, марганець.

Латуні добре штампуються та легко піддаються глибокій витяжці тощо. Тому латунь широко застосовують в електротехніці для виготовлення струмопровідних деталей (контакти термобіметалевого реле, екрани контурів, пластини повітряних конденсаторів змінної ємності, ковпачки радіотехнічних ламп).

У позначеннях марок складних латуней після букви Л (позначення латуні) ставляться букви, які вказують на наявність легуючих елементів (крім міді), наприклад ЛС 59-1 (59 % міді, 1 % свинцю, решта цинк).

Алюміній та його сплави

Алюміній АІ — це сріблясто-білий легкий і пластичний метал. Густина литого алюмінію близько 2600, прокатоного — 2700 кг/м³. Алюміній має такі особливості:

питомий електричний опір ρ (при вмісті домішок не більше 0,05%) в 1,63 разу більший, ніж у міді, тому заміна міді алюмінієм не завжди можлива, особливо в радіоелектроніці; приблизно в 3,5 рази легше міді;

через високі значення його питомої теплоємності для нагрівання алюмінію до температури плавлення та переведення у розплавлений стан необхідні більші витрати теплоти, ніж для нагрівання та розплавлення такої ж кількості міді;

навіть при однаковій вартості алюмінію та міді в зливках вартість алюмінієвого дроту майже вдвічі нижча за мідний, але використання алюмінію для виготовлення ізольованих проводів у більшості випадків менш вигідне через витрати на ізоляцію;

на повітрі активно окислюється та вкривається тонкою окисною плівкою з великим електричним опором, яка захищає метал від подальшої корозії, але утворює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів; менш дефіцитний ніж мідь;

суттєвою вадою алюмінію як провідникового матеріалу є його низька механічна міцність; для її підвищення алюміній піддають механічній обробці;

через наявність окисної плівки неможливо виконувати паяння алюмінію звичайними методами; для цього використовують спеціальні пасти-припої або ультразвукові паяльники;

прокатка, протягування та випал алюмінію аналогічні відповідним операціям для міді; електропровідність алюмінію значно знижується при наявності в ньому домішок.

Алюміній високого ступеня чистоти (домішок не більше 0,001...0,01 %) марок А999 та А995 використовують для виготовлення анодної та катодної фольги електротехнічних конденсаторів і в мікроелектроніці для отримання тонких плівок.

Менш чистий алюміній марок А97 та А95 (домішок не більше 0,03 %) використовують для корпусів електролітичних конденсаторів, статорних і роторних пластин повітряних конденсаторів. З алюмінієвої фольги та стрічки виготовляють екрани радіочастотних коаксіальних кабелів.

Промисловість випускає алюмінієвий дріт таких марок: АТМ — твердий підвищеної міцності, АТ – твердий, АНТ – напівтвердий, АМ — м'який.

Алюмінієві сплави. Алюмінієві сплави одержують при додаванні до алюмінію різних металів (мідь, магній, цинк, кремній, літій), які мають високі показники механічних властивостей, малу щільність, високу електро- і теплопровідність, а також корозійну стійкість. Сплав *альдрей* (0,3...0,5 % міді, 0,4...0,7 % кремнію, 0,2...0,3 % заліза, решта алюміній) має такі властивості:

підвищену механічну міцність;

сплав зберігає легкість чистого алюмінію та близький до нього питомий електричний опір 0,0317 мкОм м;

більш високу границю вібраційної міцності порівняно з чистим алюмінієм.

Сплав *альдрей* використовують для виготовлення проводів малонавантажених ліній електропередачі.

Магналій — міцний і корозійностійкий сплав алюмінію з магнієм, який має низьку густину. Використовується для виготовлення стрілок різних електрорадіотехнічних приладів.

Силумін відноситься до групи ливарних сплавів з підвищеним вмістом кремнію, міді та марганцю. Він має добру рідкотекучість, малу усадку, велику густину та підвищену міцність порівняно з алюмінієм і широко застосовується для корпусів повітряних конденсаторів.

Дюралюмін добре оброблюється різанням, стійкий проти корозії, має високі ливарні властивості. Для поліпшення механічних властивостей у силумін вводять модифікатори — натрій або суміш фтористих солей натрію і калію. Невелика кількість натрію (0,01%) різко змінює структуру силуміну.

Силумін та інші ливарні сплави маркуються буквами АЛ і числом, що вказує порядковий номер сплаву (АЛ1, АЛ5). Він належить до деформуєвальних сплавів алюмінію з міддю, магнієм і марганцем. Мідь і магній поліпшують механічні властивості сплаву, а марганець збільшує твердість і корозійну стійкість, яка недостатня порівняно з іншими корозійними сплавами. Для захисту від корозії його вкривають лаками, фарбами або шаром алюмінію.

У позначеннях дюралюмінів після букви Д стоять цифри, що вказують на наявність легуючих домішок, наприклад Д1 (3,8% міді, 0,4...0,8% магнію, марганцю).

Алюмінієві сплави, що обробляються тиском, поділяються на незміцнювальні і зміцнювальні термічною обробкою. До незміцнювальних відносять сплави з марганцем та магнієм; до зміцнювальних — дюралюміній.

Матеріали з високим опором.

Як матеріали з високим опором використовують металеві сплави типу твердих розчинів заміщення, металеві та вугільні плівки, провідникові композиції. Матеріали високого опору за призначенням можна поділити на провідникові резистивні матеріали, плівкові резистивні матеріали, матеріали для термопар.

1. Провідникові резистивні матеріали

Провідникові резистивні матеріали розподіляють на сплави для дротяних резисторів (манганін, константан) та для нагрівальних елементів (ніхром, фехраль, хромаль).

До д р о т я н и х р е з и с т и в н и х м а т е р і а л і в висувають такі вимоги:

питомий електричний опір при нормальній температурі не менше 0,3 мкОм-м та висока стабільність його значень з часом;

малий температурний коефіцієнт термоЕРС у парі з міддю;

малий температурний коефіцієнт питомого електричного опору;

технологічність.

На відміну від матеріалів з високою провідністю (чистих металів) резистивні матеріали є в основному сплавами з помітно деформованими кристалічними ґратками, що характерно для твердих розчинів металів. Для отримання дроту різного діаметра, який використовується для виготовлення дротяних резисторів, найбільшого поширення набули сплави на основі міді та

нікелю. Найважливіші електричні характеристики цих сплавів залежать від процентного співвідношення міді та нікелю.

Манганін — порівняно пластичний сплав, який отримав свою назву через вміст у ньому марганцю (від *латин*, *manganum*). Його приблизний склад: мідь Cu — 85 % (великий вміст міді надає сплаву жовтого кольору), марганець Mn — 12 %, нікель Ni — 3%.

Для забезпечення невеликого значення температурного коефіцієнта питомого електричного опору ТКр та стабільності коефіцієнта питомого електричного опору ρ манганін піддають відпалу у вакуумі при температурі приблизно 550...600°C протягом 10 годин з подальшим повільним охолодженням. Інколи додатково відпалюють намотані котушки при температурі 200°C.

Після прокатки та волочіння із манганіну можна отримати дріт діаметром 0,02 мм. При температурі 60°C манганіновий дріт починає окиснюватись, тому його використовують у скляній ізоляції яка відрізняється високими електроізоляційними властивостями, підвищеною нагріво- та вологостійкістю. Налагоджене промислове виробництво твердого невідпаленого і м'якого відпаленого дроту.

Провід обмотковий з манганіну круглого перерізу випускають з емалевою, емалево-волокнутою та волокнутою ізоляцією. Манганінові мікропроводи в скляній ізоляції використовують для конструювання мініатюрних високоточних елементів, у тому числі прецизійних резисторів великих номіналів. Скляна ізоляція відрізняється високими електроізоляційними властивостями, підвищеними термо- і вологостійкістю, стійкістю проти дії агресивних середовищ (за винятком плавикової кислоти).

До недоліків манганінового мікропроводу відносять невисоку відтворюваність характеристик та знижену гнучкість через крихкість скляної ізоляції.

Константан — це твердий розчин нікелю та міді, який отримав свою назву за високу сталість коефіцієнта питомого електричного опору ρ (константа) при зміні температури. Шкідливою домішкою для константану є сірка Б, яка утворює з нікелем евтектику з низькою температурою плавлення. При цьому зв'язок між зернами компонентів, що сплавляються, порушується і переробка зливок у дріт стає неможливою. Евтектика сприяє розвитку міжкристалічної корозії. Для усунення шкідливого впливу сірки до складу сплаву вводять марганець. Після гомогенізації* константанові зливки піддають прокатці та волочінню і протягують у дріт діаметром до 0,02 мм. Орієнтовний склад константану: мідь Cu — 58,5%, нікель Ni — 40%, марганець Mn — 1,5%.

Нагрівостійкість константану вища, ніж марганцю, гранично допустима температура при тривалій роботі досягає 500°C. При нагріванні до високих температур (приблизно 900°C) константан окиснюється з утворенням оксидної ізолювальної плівки. Це дозволяє використовувати його для виготовлення реостатів, резисторів та електронагрівальних елементів без спеціальної міжвиткової ізоляції, якщо робоча напруга між сусідніми витками невелика. Але у парі з міддю константан утворює порівняно високу термоЕРС, що є перешкодою використання константанових резисторів у точних вимірювальних схемах. Але ця ж властивість константану дозволяє використовувати його у парі з міддю для виготовлення термопар. Константан застосовують для виготовлення потенціометрів, гасильних резисторів.

Широкому використанню константану перешкоджає його підвищена вартість через великий вміст у ньому дефіцитного нікелю.

До сплавів для електронагрівальних елементів висуваються такі вимоги: високий коефіцієнт питомого електричного опору ρ , малий температурний коефіцієнт питомого електричного опору ТКр, тривала робота на повітрі за високих температур, технологічність, невисока вартість і доступність компонентів.

До нагрівостійких сплавів відносять сплави на основі заліза, нікелю, хрому та алюмінію. Висока нагрівостійкість цих сплавів досягається завдяки введенню до їхнього складу досить великої кількості металів, які при нагріванні на повітрі утворюють суцільну оксидну плівку.

Ніхром — це тверді розчини нікель — хром (Ni — Cr) або потрійні сплави нікель — хром — залізо (Ni — Cr — Fe).

Залізо вводять до сплаву для поліпшення оброблюваності та зниження вартості, але на відміну від нікелю та хрому залізо легко окиснюється, що призводить до зниження

нагрівостійкості сплаву; вміст хрому надає оксидам високу тугоплавкість. Близькість значень температурних коефіцієнтів лінійного розширення ТКІ їхніх сплавів та оксидних плівок підвищує стійкість хромонікелевих сплавів при високих температурах повітря. Оксидні плівки розтріскуються при різких змінах температури, в результаті чого кисень з повітря проникає в тріщини, що утворилися, і спонукає продовження процесу окиснення. Тому при багаторазовому короткочасному вмиканні електронагрівального елемента із ніхрому він перегоряє значно швидше, ніж у випадку безперервної роботи при цій самій температурі. Для збільшення терміну придатності трубчастих нагрівальних елементів ніхромовий дріт вміщують у трубки із стійкого до окиснення металу та заповнюють їх діелектричним порошком з високою теплопровідністю (магnezій Mg). Такі нагрівальні елементи використовують, наприклад, в електричних кип'ятильниках, які можуть працювати тривалий час.

Ніхромовий дріт використовують для виготовлення дротяних резисторів, потенціометрів, паяльників, електропечей та плівкових резисторів інтегральних схем. Використання дроту із ніхрому в дротяних резисторах ґрунтується на тому, що він має малий температурний коефіцієнт опору в широкому інтервалі температур, невелику термоЕРС у парі з міддю, високу стабільність опору в часі.

Як і константани, ніхроми містять велику кількість дорогого нікелю. Хромоалюмінієві сплави *фехраль* та *хромаль* набагато дешевші ніхромів, оскільки хром та алюміній порівняно дешевші та менш дефіцитні. Але вони менш технологічні, більш тверді та крихкі. З них виготовляють дріт великого діаметру та стрічки з великим поперечним перерізом, тому їх використовують в електронагрівальних пристроях великої потужності та промислових електричних печах.

2. Плівкові резистивні матеріали

Плівкові резистивні матеріали широко використовуються при виготовленні постійних і змінних резисторів різних типів. Властивості резистивних плівок значно відрізняються від властивостей вихідних матеріалів. Тонкі резистивні плівки наносять на ізоляційну основу (підкладки) методом термічного випаровування у вакуумі; катодним реактивним та іоноплазменним розпилюванням, електрохімічним і хімічним осадженням та ін. Як основу використовують скло, кераміку, ситал, полікор, шаруваті пластики та ін.

До матеріалів, які використовуються для виготовлення плівкових резисторів, висувають такі вимоги: можливість виготовлення стабільних у часі резисторів з низьким температурним коефіцієнтом питомого електричного опору ТКр, виражена адгезія до підкладок, висока корозійна стійкість проти тривалої дії високої температури.

Залежно від складу вихідних матеріалів плівкові резистори поділяються на металоплівкові і металооксидні, композиційні, вуглецеві.

Для виготовлення *металоплівкових* і *металооксидних* резисторів використовують тугоплавкі метали тантал, титан, нікель, хром, паладій, реній, вольфрам та сплави на їхній основі.

Металоплівкові резистори мають такі властивості:

- товщина тонких резистивних плівок — 1...10 мкм;
- підвищені значення питомого поверхневого опору;
- низькі значення температурного коефіцієнта поверхневого електричного опору;
- температурний коефіцієнт питомого електричного опору плівок, товщиною менше декількох нанометрів від'ємний;
- дрібнозерниста структура;
- питомий об'ємний опір плівок залежить від товщини і більший, ніж у вихідних матеріалів.

Залежно від товщини плівок та умов їх нанесення параметри металоплівкових резисторів можна регулювати в широкому діапазоні. Для підвищення електричного опору резистивних плівок з титану та танталу їх наносять реактивним розпилюванням в азоті, кисні або вуглеці, тобто суміщають процеси одержання провідних та діелектричних шарів в одному циклі з використанням одного і того самого матеріалу.

Плівкові резистори з ренію та вольфраму отримують методом катодного розпилювання та

захищають тонким шаром діоксиду кремнію для стабілізації електричного опору. Такі плівкові резистори мають наступні властивості: електричний опір у декілька тисяч Ом на квадрат поверхні, низький температурний коефіцієнт питомого електричного опору, високу стійкість проти окиснення, здатність працювати при високих питомих навантаженнях, здатність працювати при підвищених температурах.

Сплави марки РС містять кремній та легуючі компоненти (хром, нікель, залізо). Їх випускають у вигляді сипких порошків з розмірами частинок 40...70 мкм та використовують для одержання тонкоплівкових, у тому числі і прецизійних мікросхем загального та поодинокого використання.

Сплави марки МЛТ містять кремній, хром, залізо, нікель, алюміній, вольфрам та деякі з них — лантаноїди. Їх випускають у вигляді дрібнозернистих порошків. Ці сплави розроблені спеціально, як резистивний матеріал, для тонкоплівкових резисторів. Вони мають високу стійкість проти окиснення і дії різних хімічно активних середовищ. Сплави МЛТ використовують для виготовлення дискретних резисторів поверхневого типу, тонкоплівкових резисторів у мікросхемах широкого призначення.

Керметні резистори мають добру однорідність властивостей та підвищену термостійкість.

Металоксидні матеріали утворюють резистивні плівки, які мають високу термостійкість. Для виготовлення таких резистивних плівок найширше використовують матеріали на основі діоксиду олова.

Плівки діоксиду олова можна наносити на ізоляційні підкладки також термічним випаровуванням з подальшим прогріванням при повільному зростанні температури.

Плівки діоксиду олова мають добру адгезію до ізоляційних підкладок та високу кислотостійкість.

Композиційні резистивні матеріали — це механічні суміші дрібнодисперсних порошків металів та їхніх сполук з органічною та неорганічною зв'язкою.

Як провідникову фазу використовують провідники (оксиди срібла, паладію, карбіди кремнію, вольфраму).

Як сполучні речовини використовують термопластичні та термореактивні полімери, порошкоподібне скло, неорганічні емалі.

Композиції, що містять органічні сполучні речовини, утворюють композиційні резистивні плівки, які доступні для дії вологи та підвищеної температури. Гранична робоча температура резистивних плівок не вище 150°C.

Композиції з неорганічними сполучними елементами після спікання при високих температурах утворюють композиційні резистивні плівки з високою волого- та теплостійкістю до температури 350°C. Але верхня межа опорів резисторів знижується, збільшується нелінійність і власні шуми.

До недоліків композиційних резистивних плівок належать підвищений рівень особистих шумів, залежність опору від частоти та старіння при тривалому навантаженні. Композиційні резистивні матеріали у вигляді плівкових покриттів і об'ємних виробів використовують для виготовлення постійних і змінних резисторів.

Вуглецеві матеріали використовують як плівковий резистивний матеріал у вигляді провідних модифікацій вуглецю: природного графіту, сажі, піролітичного вуглецю.

Піролітичний вуглець отримують розкладанням вуглеводнів при високій температурі у вакуумі або середовищі інертного газу. Піролізу піддають, як правило, вуглеводні метанового ряду, які при високих температурах розкладаються з утворенням на ізоляційних підкладках піролітичного вуглецю. За структурою та властивостями *піролітичний вуглець близький до графіту*.

Піролітичні резистивні плівки вуглецю мають такі властивості: товщина не більше 6... 10 мм, висока стабільність параметрів, стійкість проти імпульсних перевантажень, низький рівень шумів, від'ємний температурний коефіцієнт питомого електричного опору, невелика залежність електричного опору від прикладеної напруги та частоти, відносно низька собівартість.

3. Матеріали для термопар

Матеріали для термопар поділяються на матеріали для термо- електродів і матеріали для

подовжувальних (компенсаційних проводів). Щоб отримати чутливу термопару, для термоелектродів вибирають матеріали, які суттєво відрізняються один від одного за значенням абсолютної термоЕРС.

Матеріали для термопар вибирають за такими характеристиками:
допустима робоча температура спаю;
питомий коефіцієнт електричного опору;
температурний коефіцієнт питомого електричного опору;
коефіцієнт термоЕРС.

Термопари можуть використовуватися для вимірювання таких температур: до 350°C — мідь-константан, мідь-копель;
до 600°C — залізо-константан, залізо-копель, хромель-копель;
до 900...1000°C — хромель-алюмель;
до 1600°C — платинородій- платина.

Дріт, виготовлений із сплаву алюмель, використовують для термоелектронів термопар, а із сплаву хромель і копель—для термоелектродів і компенсаційних проводів термопар. Точність вимірюван термопарами залежить від багатьох факторів. Так, точність вимірювання термопарою мідь-константан залежить від однорідності константанового електрода та від поперечного перерізу дроту. Як показали дослідження, постійність характеристик більш товстого дроту більша, ніж тонкого. Тому для термопар рекомендується використовувати константановий дріт діаметром не менше 0,25 мм, а мідний діаметром не менше 0,15 мм.

Для вимірювання криогенних температур можна використовувати термопару залізо—золото.

Для вимірювання високих температур використовують термопари вольфрамо-ренієві (до 2800°C), вольфрамо-іридієві (до 2100°C), молібдено-вольфрамові (до 2000°C), молібден-нікелієві (до 1150°C) та ін. Вимірювання високих температур виконують у вакуумі, водні та, інертних газах.

Благородні метали та їх сплави. Тугоплавкі метали

До благородних металів належить срібло, платина, паладій, золото. Внаслідок хімічної інертності щодо умов навколишнього середовища і впливу агресивних речовин вони є незамінними для виготовлення відповідальних електричних контактів виводів інтегральних мікросхем і напівпровідникових приладів термометрів опору, термопар нагрівальних елементів, що експлуатується в особливих умовах.

Срібло Ag — білий блискучий метал з нижченаведеними властивостями:

висока електропровідність;

високими механічними властивостями (границя міцності при розтягу 200 МПа, відносне видовження при розриві приблизно 50%), що дозволяє виготовляти провідники різного діаметра, включаючи і мікропроводи діаметром 20 мкм та менше;

при впалюванні або напиленні утворює міцні покриття на діелектриках;

при підвищених температурах і вологості атоми срібла мігрують по поверхні та всередині діелектрика, що викликає порушення роботи пристроїв;

хімічна стійкість нижча, ніж у інших благородних металів;

утворює оксиди з високою електропровідністю; утворює плівки сірчаніх сполук з підвищеним питомим опором, що вимагає захисту срібного покриття лаком або тонкій шаром більш стійкого металу (наприклад, паладію); гостродефіцитний матеріал.

Срібло — пластичний матеріал, піддається механічній та пластичній обробці всіх видів. Добре паяється звичайним припоєм. При нормальних умовах срібло практично не окиснюється. У концентрованих сірчаній та азотній кислотах срібло розчиняється.

Як провідниковий матеріал використовують сплави срібла: срібло-платинові (3,6... 12,6% платини Pt); срібло-паладієві (19,6...40,5% паладію Pd); срібло-мідні (2,7...50,5% міді Cu).

Успішно використовують також сплави срібло-магній-нікель, срібло-магній-цирконій та ін.

Срібло використовують у виробництві конденсаторів у чистому вигляді та сплавах як матеріал для слабкострумних контактів, у вигляді гальванічних покриттів у відповідальних ВЧ і НВЧ пристроях і тонких струмопровідних плівок у печатних платах, у монтажних проводах. Срібло входить до складу тугоплавких срібних припоїв.

Платина Pt — світло-сірий метал з нижченаведеними властивостями:

не сполучається з киснем;

найбільш хімічно стійкий (стійкий проти більшості кислот);

мас високу пластичність;

легко піддається механічній обробці;

утворює спаї з легкоплавким склом завдяки близькості коефіцієнтів лінійного розширення; використовується рідко через високу вартість.

Через високу вартість, а також для надання виробам необхідних властивостей, платину використовують у сполуках з паладієм, іридієм, родієм, рутенієм, міддю, нікелем та ін.

Платино-мідні сплави (2,2...8,9% міді) використовують для потенціометрів; платино-паладієві (9,6...20,5% паладію) — для контактів потенціометрів припоїв.

Платину використовують як матеріал для сіток у потужних генераторних лампах, при виготовленні термопар у парі з платино- родієм для вимірювання високих температур (до 1600°C), для особливо тонких ниток (діаметром приблизно 1 мкм) в рухомих системах електрометрів.

Паладій Pd — білий пластичний метал, за своїми властивостями близький до платини, у багатьох випадках замінює платину.

Паладій легше, ніж інші платинові метали, піддається хімічному впливу. Він добре розчиняється в суміші соляної та азотної кислот. У концентрованій гарячій азотній кислоті і в концентрованій сірчаній кислоті розчиняється при 300°C. При нагріванні до 700°C паладій окиснюється. При кімнатній температурі реагує з вологим хлором і бромом, а з сіркою — при температурі червоного розжарення.

Паладієво-вольфрамовий сплав (20% вольфраму) застосовується в малогабаритних резисторах змінного опору як резистивний матеріал. Порошки срібно-паладієвих сплавів і чистого паладію використовують як провідниковий компонент паст, що використовують для створення товстоплівкових резисторів у гібридних інтегральних мікросхемах.

Золото Au — це метал жовтого кольору з такими властивостями:

має високу пластичність, що дозволяє отримувати фольгу товщиною 0,08 мкм і менше (це у 250 разів тонше волосини людини);

корозійна стійкість до утворення сірчаних плівок за кімнатної температури та при нагріванні;

хімічна стійкість.

Золото розчиняється тільки в суміші соляної і азотної кислот, хлорній воді, ціаністих розчинах, безводній селеновій кислоті.

Золото у чистому вигляді та у вигляді сплавів з платиною, сріблом, нікелем, цирконієм, які мають підвищену твердість, виражену ерозійну та корозійну стійкість, використовують для виготовлення прецизійних контактів, малогабаритних реле, електродів фотоелементів, для вакуумного напилювання тонких плівок напівпровідникових і гібридно-плівкових інтегральних схем, позолочення контактних поверхонь електронних лаяв НВЧ, корпусів мікросхем, припоїв.

До тугоплавких відносять метали з температурою плавлення понад 1700°C. Ці метали хімічно стійкі при низьких температурах, але при підвищених температурах активно взаємодіють з атмосферою. Тому вироби з них експлуатуються у вакуумі або в середовищі інертних газів (аргон, азот та ін.). Механічна обробка тугоплавких металів утруднена через їх підвищену твердість і крихкість.

Тугоплавкі метали (хром Cr, вольфрам W, реній Re, молібден Mo, тантал Ta, титан Ti, ніобій Nb, цирконій Zr, гафній Gf) застосовують в електровакуумній техніці, напівпровідниковому виробництві та мікроелектроніці, для рухомих контактів і як матеріал для надпровідників.

Хром Cr — твердий тугоплавкий метал сіро-стального кольору.

Хром входить до складу ніхромів та інших сплавів для нагрівальних елементів, а також до складу нержавіючих, жароміцних і кислотостійких сталей.

Із тонких плівок хрому виготовляють резистори та адгезійні підшари для контактних площадок і струмопровідних комунікацій в інтегральних схемах, а також світлонепроникні

шари фотошаблонів. Металевий хром використовують для одержання тонкоплівкових резисторів.

Вольфрам W — це світло-сірий метал, який має такі властивості:

найвища температура плавлення;

дуже висока густина;

порівняно дорогий, обробляється з труднощами і тому використовується там, де його не можна замінити.

Вольфрам має високу температуру плавлення, малу швидкість випаровування та задовільну механічну міцність у розжареному стані. Тому його використовують в електровакуумних приладах переважно при високих температурах. Основна сфера використання вольфраму — виготовлення ниток розжарювання освітлювальних ламп, катодів прямого та непрямого розжарювання потужних генераторних ламп, рентгенівських трубок, розмикальних контактів реле, випарників для нанесення у вакуумі тонких плівок різних матеріалів.

Реній Re — сірувато-білий рідкоземельний метал. Він має такі властивості:

корозійна стійкість (до температури 1000°C не окиснюється);

мала випаровуваність при високих температурах у середовищі технічного вакууму.

За тугоплавкістю реній займає друге місце після вольфраму Пластичний в ливарному та рекристалізованому станах реній піддається холодній деформації. При гарячій деформації на повітрі спостерігається його ломкість. Реній та його сплави використовують у виробництві електроламп і електровакуумних приладів.

У радіоелектроніці реній використовують для захисту від корозії та спрацювання деталей з міді, срібла, нікелю, вольфраму, молібдену. Тонкі плівки ренію використовують для створення прецизійних резисторів в інтегральних мікросхемах.

Молібден Mo — близький за своїми властивостями до вольфраму метал, але майже у 2 рази легший за нього. Він має такі властивості:

найнижчий питомий електричний опір з усіх тугоплавких металів;

допустима робоча температура нижча, ніж у вольфраму;

окиснення починається при температурі 500°C.

Молібден використовують для виготовлення анодів і сіток генераторних ламп, гачків для підтримування вольфрамових ниток.

Тантал Ta — сірувато-білий надпровідниковий метал, який має такі властивості: ковкість, в'язкість, висока пластичність, здатний поглинати гази в електровакуумному приладі.

Тантал застосовують як матеріал для нагрівників та випарників, які використовуються в технології вакуумного нанесення тонких плівок. Його використовують в електровакуумній промисловості для виготовлення анодів і сіток генераторних ламп, прямо каналних катодів складної форми.

Титан Ti має такі властивості: пластичність. Порівняно високу механічну міцність, високу газопоглинальну здатність.

Чистий титан є пластичним і в'язким металом. Він легко піддається гарячому куванню, холодному прокатуванню, волочінню, витяжці, обробці різанням, точковому зварюванню. Титан стійкий на повітрі до 700°C; при розжарюванні вище 800°C в кисні спалахує.

Титан використовується для порошкоподібних покриттів молібденових і вольфрамових електродів електровакуумних приладів, які працюють при високих температурах.

Ніобій Nb — це метал сірувато-білого кольору, який має такі властивості: пластичність; добре піддається механічній обробці; у зливках при кімнатній температурі не піддається корозії, але його порошок помітно окиснюється на повітрі.

Ніобій — порівняно дорогий метал і тому використовується тільки у відповідних електровакуумних приладах.

Ніобій використовується для виготовлення катодів генераторних ламп, анодів, керуючих сіток, надпровідникових магнітів, НВЧ резонаторів і хвильоводів тощо.

Цирконій Zr — сріблясто-білий метал. У природі зустрічається у вигляді мінералів цирконію. Металевий цирконій технічної чистоти має виражену пластичність і в'язкість, легко піддається прокатці, волочінню, обробці тиском і різанням, зварюється точковим зварюванням в інертному газі.

Характерною особливістю цирконію є його здатність при температурі 400...1500°C поглинати всі гази, крім інертних, з утворенням стійких хімічних сполук. Висока концентрація цирконового пилу у повітрі пожежонебезпечна, оскільки порошкоподібний цирконій за температури вище 75°C легко спалахує.

Гафній Gf — метал, який за зовнішнім виглядом нагадує сталь» має добру пластичність і ковкість; стійкий проти окиснення до температур приблизно 950°C.

Його використовують як домішок до вольфраму, молібдену, танталу для підвищення терміну їх використання, а також для виготовлення ниток розжарювання електричних ламп, катодів рентгенівських трубок.

Неметалеві провідникові матеріали

Матеріали для електровугільних виробів

До електротехнічних вугільних виробів (скорочено електро- вугільні вироби) відносять щітки електричних машин, електроди для прожекторів та електролітичних ванн, аноди гальванічних елементів, мікрофони, що містять вугільний порошок, вугільні високо- омні резистори, розрядники для телефонних мереж.

Первинною сировиною для виробництва **електровугільних виробів** є графіт, сажа та антрацит.

Природний графіт — кристалічна речовина, одна з форм вуглецю шаруватої структури (відомо три видозміни вуглецю: алмаз, графіт та аморфний вуглець — вугілля

Добувають природний графіт збагаченням спеціальних руд. Штучні графіти отримують перекристалізацією вугілля при тинкратурі 2200...2500° С. У багатьох випадках їм надають перевагу над природними, оскільки штучні графіти мають дуже чистий склад, а їх вартість не перевищує вартості природних графітів.

Вироби з графіту можна використовувати тільки в інертному середовищі або у вакуумі при температурі до 2000°C, а в середовищі кисню із діоксиду вуглецю - при температурі до 500°C.

Графіт виготовляють у вигляді пруття, пластин, брусків.

Піролітичний вуглець одержують у процесі термічного розкладання без доступу кисню (піролізу) газоподібних вуглеводнів у камері, де знаходяться скляні або керамічні заготовки основ для недротяних резисторів. Піролізу піддають, як правило, вуглеводні метанового ряду, які мають властивість при високих температурах розкладатися з утворенням на ізоляційних підкладках вуглецю. В технологічних процесах виготовлення недротяних резисторів найчастіше використовують метан, пари бензину або гептану. На відміну від монокристалічного графіту структура піролітичного вуглецю не має чіткої періодичності в розміщенні атомних шарів при збереженні їх паралельності. Відстань між атомами вуглецю у піролітичного вуглецю менша, ніж у графіту. Піролітичний вуглець складається з окремих полікристалічних конгломератів, які осаджуються на поверхні ізоляційної основи (підкладки).

Піролітичні плівки вуглецю мають такі властивості:

- високу стабільність параметрів; низький рівень шумів;
- незначний та незмінний температурний коефіцієнт опору;
- незначна залежність опору від прикладеної напруги;
- стійкість проти імпульсних перенавантажень;
- відносно низька собівартість.

Природний графіт, сажу, піролітичний вуглець і боровуглецеві плівки використовують як провідний матеріал для недротяних лінійних резисторів, які повинні мати малу залежність електричного опору від напруги та високу стабільність при підвищеній температурі та вологості Недротяні резистори відрізняються від дротяних меншими розмірами та високою верхньою границею номінального опору. Вугільні матеріали використовують для виготовлення щіток.

Щітки призначені для утворення ковзного контакту між нерухомими та обертальними частинами електричних машин. Різні марки щіток відрізняються за значенням питомого електричного опору, допустимою густиною струму, коефіцієнтом тертя, лінійною швидкістю на колекторі, складом, технологією виготовлення, розміром (контактна поверхня щітки, яка прилягає до колектора, може мати розміри від 4x4 до 35x35 мм, висота щітки 12...70 мм).

Промисловість випускає щітки різних марок: вугільно-графітні, графітні, електрографітовані, тобто піддані графітуванню; мідно-графітні з вмістом міді, що призводить до зниження електричного опору та незначного контактного падіння напруги між щітками і колектором.

Сажі - це дрібнодисперсний вуглець з домішками смолистих речовин. Лаки з домішками вуглецю мають широкий діапазон питомого електричного опору (0,01...400 Ом *м).

Для одержання стержневих електродів сажу та графіт змішують із в'язучими матеріалами, для цього використовують кам'яновугільну смолу, а інколи рідке скло. Одержану масу продавлюють через мундштук або пресують у відповідних прес-формах і піддають термообробці. Від режиму відпалу залежить форма, в якій вуглець знаходиться у виробі. При високих температурах відпалу (2200°C) вуглець штучно перетворюється у графіт, розміри кристалу графіту збільшуються, підвищується провідність матеріалу і знижується його твердість. Цей процес називається *графітуванням*.

Антрацит — блискуче, чорного кольору викопне вугілля з найбільш високим ступенем зміни структури в низці кам'яного вугілля. Горить незначним полум'ям, майже без диму, не спікається. Антрацит використовують у вигляді вугільних порошків і вугільних матеріалів.

Вугільні порошки для мікрофонів одержують дробленням антрациту. Питомий електричний опір порошку залежить від розмірів зерен, щільності засипання порошку у форму і режимів термообробки. Дрібнозернисті порошки одержують після просіювання крізь сито з 52 отворами на 1 см², а крупнозернисті — крізь сито з 45 отворами на 1 см². В процесі випалу при температурі 600...800°C збільшується питомий електричний опір порошку. Питомий електричний опір дрібнозернистого порошку ~ 0,4 Ом.

Вугільні матеріали (подрібнений антрацит зі зв'язкою) для вугільних електродів, що призначені для роботи при високих температурах, випалюють при температурах 3000°C.

Особливістю вугільних виробів є те, що вони мають від'ємний температурний коефіцієнт питомого електричного опору

Провідні та резистивні композиційні матеріали

Провідні композиційні матеріали — це механічні суміші дрібнодисперсних порошків металів та їхніх сполук з органічною або неорганічною зв'язкою.

Композиційні матеріали поєднують в собі низку цінних властивостей:
великий питомий електричний опір, що має незначну залежність від температури;
можливість керування електричними властивостями зі зміною складу;
порівняно просту технологію виготовлення.

Основні недоліки композиційних матеріалів — це підвищений рівень власних шумів, залежність опору від частоти, старіння за умови тривалого навантаження.

Провідні композиційні матеріали використовують у вигляді паст або порошків. За призначенням їх можна розподілити на композиційні матеріали для одержання бездротових композиційних резисторів, провідників і резисторів товстоплівкових мікросхем і металізації металокерамічних корпусів.

Для виготовлення композиційних резисторів змішують провідний матеріал, органічні та неорганічні в'язучі, наповнювач і пластифікатор.

При використанні складних гетерогенних систем одержують композиційні резистори з опором від часток Ома до декількох тисяч Ом.

Як провідну фазу використовують провідники — порошки срібла, паладію, золота, родію; напівпровідникові матеріали - діоксид олова, оксид кадмію, карбіди кремнію, вольфраму, силіциди металів, а також графіт або сажу.

Як органічні в'язучі використовують фенольні або ефірні смоли — епоксидну, гліфталну, кремнійорганічну. Композиції, що містять органічні в'язучі речовини, порівняно легко змінюють свої властивості під дією вологи та підвищеної температури. Граничні робочі температури їх не перевищують 150°C.

У металокерамічних і металополімерних композиціях, які містять неорганічні в'язучі речовини (полімери, порошкоподібне скло, неорганічні емалі), після спікання при високих температурах досягається висока вологостійкість і теплостійкість (робоча температура підвищується до 350°C), але збільшується нелінійність і власні шуми, знижується верхня границя опору резисторів. Металокерамічні композиційні матеріали мають низьке абсолютне значення температурного коефіцієнту опору.

Провідні пасти повинні забезпечувати низький питомий опір плівок та малу активність при контакті з хімічно активними матеріалами при високій температурі. До складу провідних паст входять функціональний матеріал (дрібнодисперсні порошки металів), постійна в'язуча (скло) і тимчасова зв'язуюча речовина (суміш декількох органічних речовин).

Електричні властивості провідної пасти визначаються складовими компонентами — порошками металів. Най ширше застосовуються пасти на основі благородних металів — срібла, золота, платини, паладію та їх сплавів.

Адгезію плівки до підкладки забезпечує постійна в'язуча речовина — порошок скла. Призначений для використання в пасті порошок скла називають *фритом*. Його одержують швидким охолодженням розплавленого скла у воді або розпилюванням стиснутим повітрям з подальшим розмелюванням частинок до розміру 1...3 мкм. Рівномірне розподілення компонентів і потрібна в'язкість паст залежить від тимчасової в'язучої речовини — органічних рідин, для чого використовують рідкі смоли, етилцелюлозу та і

Резистивні пасти відрізняються від провідних за складом функціональних матеріалів, для яких використовують ті самі метали в комбінації з ізоляційними та напівпровідниковими матеріалами. Провідні і тимчасові в'язучі елементи у них аналогічні. Резистивні плівки з різноманітним опором можна одержати, якщо змінювати відсотковий вміст компонентів у пасті.

Пасти на основі срібла з паладієм дозволяють одержувати резистори з високим питомим електричним опором. Більш низьку чутливість до процесу впікання мають пасти на основі діоксиду рутенію.

Резистивні композиції, які не містять дорогих матеріалів, оаср* жують на основі оксиду талію, індію, олова, кадмію і тугоплавкі сполук різних металів (боридів, карбідів та ін.

Для паст, які повільно сохнуть (час висихання 80... 100 с), як розчинник використовують циклогексанон; для паст, які помірно сохнуть (час висихання 20...30 с), — ізобутиловий спирт, а на етиловому спирті виготовляють пасти, що сохнуть швидко (час висихання 3..5 с).

Біндер на основі полівінілбутиралу одержують перемішуван* ням початкових компонентів на валках протягом однієї-двох діб до одержання прозорого розчину, який має такі переваги: вишка механічна міцність, термостійкість металокерамічних спаїв, можливість одержування паст з різним часом висихання, вибухобезпечність, простота приготування; полівінілбутираль дешевий та недефіцитний.

Для приготування металізованої пасти компоненти (порошки та біндер) старанно перемішують у кульовому млині протягом декількох годин і проціджують крізь сито. Готову пасту зберігають у скляних банках з пробками, що щільно закриваються, при цьому на етикетках вказують склад пасти та дату її виготовлення.

Металізовані пасти мають обмежений термін зберігання, оскільки швидко загусають та розшаровуються, тому в процесі роботи їх постійно перемішують і періодично контролюють в'язкість. Незалежно від складу паст попадання в них води небажано, оскільки при цьому виникає згортання (*коагуляція**) паста.

Пасти наносять на кераміку пензликом, пульверизацією, контактним перенесенням, занурюванням, шовкографією, запресуванням або напилюванням.

При впіканні паст виникають складні процеси спікання металізаційного шару та утворення його міцного зв'язку з керамікою внаслідок хімічної взаємодії компонентів металізації і кераміки, і також у результаті міграції скла в металізований шар. Густина молибдену у металізованих шарах після термообробки становить лише 50...60% густини конструкційного молибдену.

Контактоли

Для одержання електричних контактів у радіоелектроніці використовують струмопровідні пасти, клеї, емалі, що об'єднуються загальною назвою — *контактоли*. Це композиції на основі епоксидних і кремнійорганічних смол з додаванням порошків металів з високою теплопровідністю. Адгезивні властивості таких композицій визначаються в'язучою основою (смолою), а провідність

Залежно від типу металевого наповнювача виділяють контактоли, які містять срібло, нікель, паладій, золото, посріблений нікель та ін.

С р і б л о в м і щ у ю ч і контактоли — пасти мають такі властивості: високий питомий електричний опір, високу стабільність властивостей при кліматичних і механічних впливах, виражену адгезію до різних матеріалів.

Струмопровідні клеї на основі срібла: К-8, К-12, К-13, К-17, К-21 і К-22 використовуються, головним чином, для склеювання поверхонь срібла, міді, скла, кераміки та ін. Кожний клей, відповідно до його властивостей, має свою область використання. Так, наприклад, струмопровідний клей К-12 має високу провідність, а також високу міцність склеювання. Його застосовують для монтажу елементів радіоелектронної апаратури, таких, як ниткові резистори, фоторезистори та ін.

Струмопровідний клей К-17 крім високої провідності має підвищений термін придатності, підвищену термостійкість і використовується у виробництві керамічних конденсаторів, для монтажу інтегральних мікросхем у корпус та ін.

Клей використовують замість паяння під час складальних операцій у виробництві напівпровідникових приладів і мікросхем.

Н і к е л ь в м і щ у ю ч і контактоли мають такі властивості: нижчий питомий опір, ніж у срібловміщуючих клейких композиціях; добру адгезію до різних матеріалів (границя міцності при зсуві $p = 2 \cdot 10^6$ Н/м²); низьку життєздатність; високу стабільність властивостей при кліматичних і механічних впливах.

Клей використовують для кріплення напівпровідникових кристалів до діелектричної підкладки із струмопровідними доріжками із забезпеченням електричного контакту.

Струмопровідні клеї на основі нікелю, як і срібловмісні, використовуються відповідно до своїх властивостей. Так, струмопровідний клей К-3 має тривалий термін придатності, високу електропровідність, що прирівнює його до срібловмісних клеїв. Він використовується при монтажі елементів у гібридних мікросхемах, виготовленні електродів до керамічних конденсаторів, при з'єднанні кварцових елементів у п'єзодатчиках.

Контактоли наносять за допомогою дозаторів (шприців). Це дозволяє дозувати кількість клейкої суміші, що має важливе значення для забезпечення високої якості контактного з'єднання.

Благородні метали та їх сплави. Тугоплавкі метали

До благородних металів належить срібло, платина, паладій, золото. Внаслідок хімічної інертності щодо умов навколишнього середовища і впливу агресивних речовин вони є незамінними для виготовлення відповідальних електричних контактів виводів інтегральних мікросхем і напівпровідникових приладів термометрів опору, термопар нагрівальних елементів, що експлуатуються в особливих умовах.

Срібло Ag — білий блискучий метал з нижченаведеними властивостями:

висока електропровідність;

високими механічними властивостями (границя міцності при розтягу 200 МПа, відносне видовження при розриві приблизно 50%), що дозволяє виготовляти провідники різного діаметра, включаючи і мікропроводи діаметром 20 мкм та менше;

при впалюванні або напиленні утворює міцні покриття на діелектриках;

при підвищених температурах і вологості атоми срібла мігрують по поверхні та всередині діелектрика, що викликає порушення роботи пристроїв;

хімічна стійкість нижча, ніж у інших благородних металів;

утворює оксиди з високою електропровідністю; утворює плівки сірчанних сполук з підвищеним питомим опором, що вимагає захисту срібного покриття лаком або тонкій шаром більш стійкого металу (наприклад, паладію); гостродефіцитний матеріал.

Срібло — пластичний матеріал, піддається механічній та пластичній обробці всіх видів.

Добре паяється звичайним припоєм. При нормальних умовах срібло практично не окиснюється. У концентрованих сірчаній та азотній кислотах срібло розчиняється.

Як провідниковий матеріал використовують сплави срібла: срібло-платинові (3,6... 12,6% платини Pt); срібло-паладієві (19,6...40,5% паладію Pd); срібло-мідні (2,7...50,5% міді Cu).

Успішно використовують також сплави срібло-магній-нікель, срібло-магній-цирконій та ін.

Срібло використовують у виробництві конденсаторів у чистому вигляді та сплавах як матеріал для слабкострумівих контактів, у вигляді гальванічних покриттів у відповідальних ВЧ і НВЧ пристроях і тонких струмопровідних плівок у печатних платах, у монтажних проводах. Срібло входить до складу тугоплавких срібних припоїв.

Платина Pt — світло-сірий метал з нижченаведеними властивостями:

не сполучається з киснем;

найбільш хімічно стійкий (стійкий проти більшості кислот);

має високу пластичність;

легко піддається механічній обробці;

утворює спаї з легкоплавким склом завдяки близькості коефіцієнтів лінійного розширення; використовується рідко через високу вартість.

Через високу вартість, а також для надання виробам необхідних властивостей, платину використовують у сполуках з паладієм, іридієм, родієм, рутенієм, міддю, нікелем та ін.

Платино-мідні сплави (2,2...8,9% міді) використовують для потенціометрів; платино-паладієві (9,6...20,5% паладію) — для контактів потенціометрів припоїв.

Платину використовують як матеріал для сіток у потужних генераторних лампах, при виготовленні термопар у парі з платино- родієм для вимірювання високих температур (до 1600°C), для особливо тонких ниток (діаметром приблизно 1 мкм) в рухомих системах електрометрів.

Паладій Pd — білий пластичний метал, за своїми властивостями близький до платини, у багатьох випадках замінює платину.

Паладій легше, ніж інші платинові метали, піддається хімічному впливу. Він добре розчиняється в суміші соляної та азотної кислот. У концентрованій гарячій азотній кислоті і в концентрованій сірчаній кислоті розчиняється при 300°C. При нагріванні до 700°C паладій окиснюється. При кімнатній температурі реагує з вологим хлором і бромом, а з сіркою — при температурі червоного розжарення.

Паладієво-вольфрамовий сплав (20% вольфраму) застосовується в малогабаритних резисторах змінного опору як резистивний матеріал. Порошки срібно-паладієвих сплавів і чистого паладію використовують як провідниковий компонент паст, що використовують для створення товстопліткових резисторів у гібридних інтегральних мікросхемах.

Золото Au — це метал жовтого кольору з такими властивостями:

має високу пластичність, що дозволяє отримувати фольгу товщиною 0,08 мкм і менше (це у 250 разів тонше волосини людини);

корозійна стійкість до утворення сірчанних плівок за кімнатної температури та при нагріванні;

хімічна стійкість.

Золото розчиняється тільки в суміші соляної і азотної кислот, хлорній воді, ціаністих розчинах, безводній селеновій кислоті.

Золото у чистому вигляді та у вигляді сплавів з платиною, сріблом, нікелем, цирконієм, які мають підвищену твердість, виражену ерозійну та корозійну стійкість, використовують для виготовлення прецизійних контактів, малогабаритних реле, електродів фотоелементів, для вакуумного напилювання тонких плівок напівпровідникових і гібридно-пліткових інтегральних схем, позолочення контактних поверхонь електронних лаяв НВЧ, корпусів мікросхем, припоїв.

До тугоплавких відносять метали з температурою плавлення понад 1700°C. Ці метали хімічно стійкі при низьких температурах, але при підвищених температурах активно взаємодіють з атмосферою. Тому вироби з них експлуатуються у вакуумі або в середовищі інертних газів (аргон, азот та ін.). Механічна обробка тугоплавких металів утруднена через їх підвищену твердість і крихкість.

Тугоплавкі метали (хром Cr, вольфрам W, реній Re, молібден Mo, тантал Ta, титан Ti, ніобій Nb, цирконій Zr, гафній Gf) застосовують в електровакуумній техніці, напівпровідниковому виробництві та мікроелектроніці, для рухомих контактів і як матеріал для надпровідників.

Хром Cr — твердий тугоплавкий метал сіро-стального кольору.

Хром входить до складу ніхромів та інших сплавів для нагрівальних елементів, а також до складу нержавіючих, жароміцних і кислотостійких сталей.

Із тонких плівок хрому виготовляють резистори та адгезійні підшари для контактних площадок і струмопровідних комунікацій в інтегральних схемах, а також світлонепроникні шари фотошаблонів. Металевий хром використовують для одержання тонкопліткових резисторів.

Вольфрам W — це світло-сірий метал, який має такі властивості:

найвища температура плавлення;

дуже висока густина;

порівняно дорогий, обробляється з труднощами і тому використовується там, де його не можна замінити.

Вольфрам має високу температуру плавлення, малу швидкість випаровування та задовільну механічну міцність у розжареному стані. Тому його використовують в електровакуумних приладах переважно при високих температурах. Основна сфера використання вольфраму — виготовлення ниток розжарювання освітлювальних ламп, катодів прямого та непрямого розжарювання потужних генераторних ламп, рентгенівських трубок, розмикальних контактів реле, випарників для нанесення у вакуумі тонких плівок різних матеріалів.

Реній Re — сірувато-білий рідкоземельний метал. Він має такі властивості:

корозійна стійкість (до температури 1000°C не окиснюється);

мала випаровуваність при високих температурах у середовищі технічного вакууму.

За тугоплавкістю реній займає друге місце після вольфраму. Пластичний в ливарному та рекристалізованому станах реній піддається холодній деформації. При гарячій деформації на повітрі спостерігається його ломкість. Реній та його сплави використовують у виробництві електроламп і електровакуумних приладів.

У радіоелектроніці реній використовують для захисту від корозії та спрацювання деталей з міді, срібла, нікелю, вольфраму, молібдену. Тонкі плівки ренію використовують для створення прецизійних резисторів в інтегральних мікросхемах.

Молібден Mo — близький за своїми властивостями до вольфраму метал, але майже у 2 рази легший за нього. Він має такі властивості:

найнижчий питомий електричний опір з усіх тугоплавких металів;

допустима робоча температура нижча, ніж у вольфраму;

окиснення починається при температурі 500°C.

Молібден використовують для виготовлення анодів і сіток генераторних ламп, гачків для підтримання вольфрамових ниток.

Тантал Ta — сірувато-білий надпровідниковий метал, який має такі властивості: ковкість, в'язкість, висока пластичність, здатний поглинати гази в електровакуумному приладі.

Тантал застосовують як матеріал для нагрівників та випарників, які використовуються в технології вакуумного нанесення тонких плівок. Його використовують в електровакуумній промисловості для виготовлення анодів і сіток генераторних ламп, прямо каналних катодів складної форми.

Титан Ti має такі властивості: пластичність. Порівняно високу механічну міцність, високу газопоглинальну здатність.

Чистий титан є пластичним і в'язким металом. Він легко піддається гарячому куванню, холодному прокатуванню, волочінню, витяжці, обробці різанням, точковому зварюванню. Титан стійкий на повітрі до 700°C; при розжарюванні вище 800°C в кисні спалахує.

Титан використовується для порошкоподібних покриттів молібденових і вольфрамових електродів електровакуумних приладів, які працюють при високих температурах.

Ніобій Nb — це метал сірувато-білого кольору, який має такі властивості: пластичність; добре піддається механічній обробці; у зливках при кімнатній температурі не піддається

корозії, але його порошок помітно окиснюється на повітрі.

Ніобій — порівняно дорогий метал і тому використовується тільки у відповідних електровакуумних приладах.

Ніобій використовується для виготовлення катодів генераторних ламп, анодів, керуючих сіток, надпровідникових магнітів, НВЧ резонаторів і хвильоводів тощо.

Цирконій Zr — сріблясто-білий метал. У природі зустрічається у вигляді мінералів цирконію. Металевий цирконій технічної чистоти має виражену пластичність і в'язкість, легко піддається прокатці, волочінню, обробці тиском і різанням, зварюється точковим зварюванням в інертному газі.

Характерною особливістю цирконію є його здатність при температурі 400...1500°C поглинати всі гази, крім інертних, з утворенням стійких хімічних сполук. Висока концентрація цирконового пилу у повітрі пожежонебезпечна, оскільки порошкоподібний цирконій за температури вище 75°C легко спалахує.

Гафній Gf — метал, який за зовнішнім виглядом нагадує сталь» має добру пластичність і ковкість; стійкий проти окиснення до температур приблизно 950°C.

Його використовують як домішок до вольфраму, молібдену, танталу для підвищення терміну їх використання, а також для виготовлення ниток розжарювання електричних ламп, катодів рентгенівських трубок.

Неметалеві провідникові матеріали

Матеріали для електровугільних виробів

До електротехнічних вугільних виробів (скорочено електро- вугільні вироби) відносять щітки електричних машин, електроди для прожекторів та електролітичних ванн, аноди гальванічних елементів, мікрофони, що містять вугільний порошок, вугільні високо- омні резистори, розрядники для телефонних мереж.

Первинною сировиною для виробництва **електровугільних виробів** є графіт, сажа та антрацит.

Природний графіт — кристалічна речовина, одна з форм вуглецю шаруватої структури (відомо три видозміни вуглецю: алмаз, графіт та аморфний вуглець — вугілля

Добувають природний графіт збагаченням спеціальних руд. Штучні графіти отримують перекристалізацією вугілля при тинкратурі 2200...2500° С. У багатьох випадках їм надають перевагу над природними, оскільки штучні графіти мають дуже чистий склад, а їх вартість не перевищує вартості природних графітів.

Вироби з графіту можна використовувати тільки в інертному середовищі або у вакуумі при температурі до 2000°C, а в середовищі кисню із діоксиду вуглецю - при температурі до 500°C.

Графіт виготовляють у вигляді пруття, пластин, брусків.

Піролітичний вуглець одержують у процесі термічного розкладання без доступу кисню (піролізу) газоподібних вуглеводнів у камері, де знаходяться скляні або керамічні заготовки основ для недротяних резисторів. Піролізу піддають, як правило, вуглеводні метанового ряду, які мають властивість при високих температурах розкладатися з утворенням на ізоляційних підкладках вуглецю. В технологічних процесах виготовлення недротяних резисторів найчастіше використовують метан, пари бензину або гептану. На відміну від монокристалічного графіту структура піролітичного вуглецю не має чіткої періодичності в розміщенні атомних шарів при збереженні їх паралельності. Відстань між атомами вуглецю у піролітичного вуглецю менша, ніж у графіту. Піролітичний вуглець складається з окремих полікристалічних конгломератів, які осаджуються на поверхні ізоляційної основи (підкладки).

Піролітичні плівки вуглецю мають такі властивості:

- високу стабільність параметрів; низький рівень шумів;
- незначний та незмінний температурний коефіцієнт опору;
- незначна залежність опору від прикладеної напруги;
- стійкість проти імпульсних перенавантажень;
- відносно низька собівартість.

Природний графіт, сажу, піролітичний вуглець і боровуглецеві плівки використовують як провідний матеріал для недротяних лінійних резисторів, які повинні мати малу залежність електричного опору від напруги та високу стабільність при підвищеній температурі та

вологості Недротяні резистори відрізняються від дротяних меншими розмірами та високою верхньою границею номінального опору. Вугільні матеріали використовують для виготовлення щіток.

Щітки призначені для утворення ковзного контакту між нерухомими та обертальними частинами електричних машин. Різні марки щіток відрізняються за значенням питомого електричного опору, допустимою густиною струму, коефіцієнтом тертя, лінійною швидкістю на колекторі, складом, технологією виготовлення, розміром (контактна поверхня щітки, яка прилягає до колектора, може мати розміри від 4x4 до 35x35 мм, висота щітки 12...70 мм).

Промисловість випускає щітки різних марок: вугільно-графітні, графітні, електрографітовані, тобто піддані графітуванню; мідно-графітні з вмістом міді, що призводить до зниження електричного опору та незначного контактного падіння напруги між щітками і колектором.

Сажі - це дрібнодисперсний вуглець з домішками смолистих речовин. Лаки з домішками вуглецю мають широкий діапазон питомого електричного опору (0,01...400 Ом *м).

Для одержання стержневих електродів сажу та графіт змішують із в'язучими матеріалами, для цього використовують кам'яновугільну смолу, а інколи рідке скло. Одержану масу продавлюють через мундштук або пресують у відповідних прес-формах і піддають термообробці. Від режиму відпалу залежить форма, в якій вуглець знаходиться у виробі. При високих температурах відпалу (2200°C) вуглець штучно перетворюється у графіт, розміри кристалу графіту збільшуються, підвищується провідність матеріалу і знижується його твердість. Цей процес називається *графітуванням*.

Антрацит — блискуче, чорного кольору викопне вугілля з найбільш високим ступенем зміни структури в низці кам'яного вугілля. Горить незначним полум'ям, майже без диму, не спікається. Антрацит використовують у вигляді вугільних порошоків і вугільних матеріалів.

Вугільні порошки для мікрофонів одержують дробленням антрациту. Питомий електричний опір порошку залежить від розмірів зерен, щільності засипання порошку у форму і режимів термообробки. Дрібнозернисті порошки одержують після просіювання крізь сито з 52 отворами на 1 см², а крупнозернисті — крізь сито з 45 отворами на 1 см². В процесі випалу при температурі 600...800°C збільшується питомий електричний опір порошку. Питомий електричний опір дрібнозернистого порошку ~ 0,4 Ом.

Вугільні матеріали (подрібнений антрацит зі зв'язкою) для вугільних електродів, що призначені для роботи при високих температурах, випалюють при температурах 3000°C.

Особливістю вугільних виробів є те, що вони мають від'ємний температурний коефіцієнт питомого електричного опору

Провідні та резистивні композиційні матеріали

Провідні композиційні матеріали — це механічні суміші дрібнодисперсних порошоків металів та їхніх сполук з органічною або неорганічною зв'язкою.

Композиційні матеріали поєднують в собі низку цінних властивостей: великий питомий електричний опір, що має незначну залежність від температури; можливість керування електричними властивостями зі зміною складу; порівняно просту технологію виготовлення.

Основні недоліки композиційних матеріалів — це підвищений рівень власних шумів, залежність опору від частоти, старіння за умови тривалого навантаження.

Провідні композиційні матеріали використовують у вигляді паст або порошоків. За призначенням їх можна розподілити на композиційні матеріали для одержання бездротових композиційних резисторів, провідників і резисторів товстоплівкових мікросхем і металізації металокерамічних корпусів.

Для виготовлення композиційних резисторів змішують провідний матеріал, органічні та неорганічні в'язучі, наповнювач і пластифікатор.

При використанні складних гетерогенних² систем одержують композиційні резистори з опором від часток Ома до декількох тисяч Ом.

Як провідну фазу використовують провідники — порошки срібла, паладію, золота, родію; напівпровідникові матеріали - діоксид олова, оксид кадмію, карбіди кремнію, вольфрам, силіциди металів, а також графіт або сажу.

Як органічні в'язучі використовують фенольні або ефірні смоли — епоксидну, гліфтальну, кремнійорганічну. Композиції, що містять органічні в'язучі речовини, порівняно легко змінюють свої властивості під дією вологи та підвищеної температури. Граничні робочі температури їх не перевищують 150°C.

У металокерамічних і металополімерних композиціях, які містять неорганічні в'язучі речовини (полімери, порошкоподібне скло, неорганічні емалі), після спікання при високих температурах досягається висока вологостійкість і теплостійкість (робоча температура підвищується до 350°C), але збільшується нелінійність і власні шуми, знижується верхня границя опору резисторів. Металокерамічні композиційні матеріали мають низьке абсолютне значення температурного коефіцієнту опору.

Провідні пасти повинні забезпечувати низький питомий опір плівок та малу активність при контакті з хімічно активними матеріалами при високій температурі. До складу провідних паст входять функціональний матеріал (дрібнодисперсні порошки металів), постійна в'язуча (скло) і тимчасова зв'язуюча речовина (суміш декількох органічних речовин).

Електричні властивості провідної пасти визначаються складовими компонентами — порошками металів. Най ширше застосовуються пасти на основі благородних металів — срібла, золота, платини, паладію та їх сплавів.

Адгезію плівки до підкладки забезпечує постійна в'язуча речовина — порошок скла. Призначений для використання в пасті порошок скла називають *фритом*. Його одержують швидким охолодженням розплавленого скла у воді або розпилюванням стиснутим повітрям з подальшим розмелюванням частинок до розміру 1...3 мкм. Рівномірне розподілення компонентів і потрібна в'язкість паст залежить від тимчасової в'язучої речовини — органічних рідин, для чого використовують рідкі смоли, етилцелюлозу та і

Резистивні пасти відрізняються від провідних за складом функціональних матеріалів, для яких використовують ті самі метали в комбінації з ізоляційними та напівпровідниковими матеріалами. Провідні і тимчасові в'язучі елементи у них аналогічні. Резистивні плівки з різноманітним опором можна одержати, якщо змінювати відсотковий вміст компонентів у пасті.

Пасти на основі срібла з паладієм дозволяють одержувати резистори з високим питомим електричним опором. Більш низьку чутливість до процесу впікання мають пасти на основі діоксиду рутенію.

Резистивні композиції, які не містять дорогих матеріалів, оаср* жують на основі оксиду талію, індію, олова, кадмію і тугоплавкі сполук різних металів (боридів, карбідів та ін.

Для паст, які повільно сохнуть (час висихання 80... 100 с), як розчинник використовують циклогексанон; для паст, які помірно сохнуть (час висихання 20...30 с), — ізобутиловий спирт, а на етиловому спирті виготовляють пасти, що сохнуть швидко (час висихання 3..5 с).

Біндер на основі полівінілбутиралу одержують перемішуван* ням початкових компонентів на валках протягом однієї-двох діб до одержання прозорого розчину, який має такі переваги: вишка механічна міцність, термостійкість металокерамічних спаїв, можливість одержування паст з різним часом висихання, вибухобезпечність, простота приготування; полівінілбутираль дешевий та недефіцитний.

Для приготування металізованої пасти компоненти (порошки та біндер) старанно перемішують у кульовому млині протягом декількох годин і проціджують крізь сито. Готову пасту зберігають у скляних банках з пробками, що щільно закриваються, при цьому на етикетках вказують склад пасти та дату її виготовлення.

Металізовані пасти мають обмежений термін зберігання, оскільки швидко загусають та розшаровуються, тому в процесі роботи їх постійно перемішують і періодично контролюють в'язкість. Незалежно від складу паст попадання в них води небажано, оскільки при цьому виникає згортання (*коагуляція**) паста.

Пасти наносять на кераміку пензликом, пульверизацією, контактним перенесенням,

занурюванням, шовкографією, запресуванням або напилюванням.

При впіканні паст виникають складні процеси зпикання металізаційного шару та утворення його міцного зв'язку з керамікою внаслідок хімічної взаємодії компонентів металізації і кераміки, і також у результаті міграції скла в металізований шар. Густина молібдену у металізованих шарах після термообробки становить лише 50...60% густини конструкційного молібдену.

Контактоли

Для одержання електричних контактів у радіоелектроніці використовують струмопровідні пасти, клеї, емалі, що об'єднуються загальною назвою — *контактоли*. Це композиції на основі епоксидних і кремнійорганічних смол з додаванням порошків металів з високою теплопровідністю. Адгезивні властивості таких композицій визначаються в'язучою основою (смолою), а провідність

Залежно від типу металевого наповнювача виділяють контактоли, які містять срібло, нікель, паладій, золото, посріблений нікель та ін.

С р і б л о в м і щ у ю ч і контактоли — пасти мають такі властивості: високий питомий електричний опір, високу стабільність властивостей при кліматичних і механічних впливах, виражену адгезію до різних матеріалів.

Струмопровідні клеї на основі срібла: К-8, К-12, К-13, К-17, К-21 і К-22 використовуються, головним чином, для склеювання поверхонь срібла, міді, скла, кераміки та ін. Кожний клей, відповідно до його властивостей, має свою область використання. Так, наприклад, струмопровідний клей К-12 має високу провідність, а також високу міцність склеювання. Його застосовують для монтажу елементів радіоелектронної апаратури, таких, як ниткові резистори, фоторезистори та ін.

Струмопровідний клей К-17 крім високої провідності має підвищений термін придатності, підвищену термостійкість і використовується у виробництві керамічних конденсаторів, для монтажу інтегральних мікросхем у корпус та ін.

Клей використовують замість паяння під час складальних операцій у виробництві напівпровідникових приладів і мікросхем.

Н і к е л ь в м і щ у ю ч і контактоли мають такі властивості: нижчий питомий опір, ніж у срібловміщуючих клейких композиціях; добру адгезію до різних матеріалів (границя міцності при зсуві $p = 2 \cdot 10^6$ Н/м²); низьку життєздатність; високу стабільність властивостей при кліматичних і механічних впливах.

Клей використовують для кріплення напівпровідникових кристалів до діелектричної підкладки із струмопровідними доріжками із забезпеченням електричного контакту.

Струмопровідні клеї на основі нікелю, як і срібловмісні, використовуються відповідно до своїх властивостей. Так, струмопровідний клей К-3 має тривалий термін придатності, високу електропровідність, що прирівнює його до срібловмісних клеїв. Він використовується при монтажі елементів у гібридних мікросхемах, виготовленні електродів до керамічних конденсаторів, при з'єднанні® кварцових елементів у п'єзодатчиках.

Контактоли наносять за допомогою дозаторів (шприців). Це дозволяє дозувати кількість клейкої суміші, що має важливе значення для забезпечення високої якості контактного з'єднання.