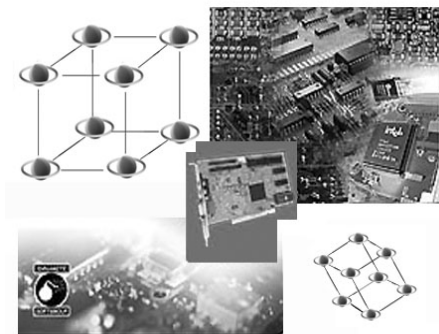


Розділ 1 ПРОВІДНИКИ



ТЕМА № 1

МАТЕРІАЛИ ВИСОКОЇ ПРОВІДНОСТІ. НАДПРОВІДНІ МАТЕРІАЛИ

- 1.1. Класифікація провідникових матеріалів
- 1.2. Матеріали високої провідності
 - 1.2.1. Мідь
 - 1.2.1.1. Одержання міді
 - 1.2.1.2. Марки міді
 - 1.2.1.3. Спеціальні сорти міді
 - 1.2.1.4. Властивості міді
 - 1.2.1.5. Застосування міді
 - 1.2.2. Алюміній
 - 1.2.2.1. Порівняння властивостей алюмінію і міді
 - 1.2.2.2. Марки алюмінію
 - 1.2.2.3. Поверхня алюмінію
- 1.3. Надпровідні матеріали
 - 1.3.1. Надпровідні метали і сплави
 - 1.3.2. Високотемпературні надпровідні матеріали
 - 1.3.4. Застосування надпровідників

1.1. Класифікація провідникових матеріалів

В даний час не існує загальноприйнятої класифікації провідникових матеріалів. У фізиці, хімії й техніці провідні матеріали класифікують за різними ознаками. Одна з можливих схем класифікації провідників за складом, властивостями і технічним призначенням показана на рисунку.

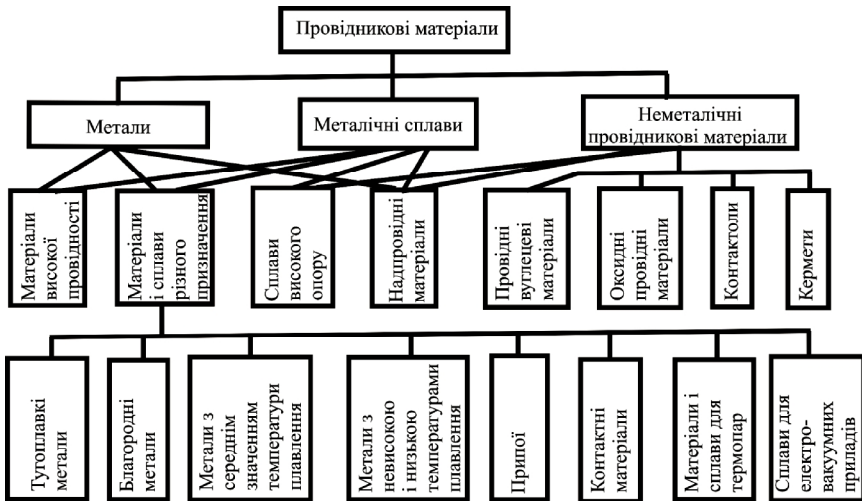


Рис. 1.1 Класифікація провідникових матеріалів

1.2. Матеріали високої провідності

До матеріалів високої провідності відносять провідники питомий електричний опір яких при нормальних умовах менший $0,1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Найбільш розповсюдженими серед цих матеріалів є мідь і алюміній.

1.2.1. Мідь

Переваги міді, що забезпечують їй широке застосування як провідникового матеріалу, наступні:

1) малий питомий опір (з усіх металів тільки срібло має трохи менший питомий опір, ніж мідь);

- 2) досить висока механічна міцність;
- 3) задовільна в більшості випадків стійкість до корозії (навіть в умовах високої вологості мідь окиснюється на повітрі значно повільніше, ніж, наприклад, залізо), інтенсивне окиснення міді відбувається тільки при підвищених температурах;
- 4) добра оброблюваність – мідь прокатується в листи, стрічки і протягується в дріт, товщина якого може бути доведена до тисячних часток міліметра;
- 5) відносна легкість пайки й зварювання.

1.2.1.1. Одержання міді

Мідь одержують шляхом переробки сульфідних руд, що частіше, ніж інші зустрічаються в природі. Після ряду плавок руди й випалів з інтенсивним дуттям мідь, призначену для електротехнічних цілей, обов'язково піддають електролітичному очищенню. Отримані після електролізу пластини міді переплавляють у болванки масою 80–90 кг, що прокатують і протягують у виробі необхідного поперечного перерізу.

Методом холодного протягування одержують тверду (твердотягнуту) мідь (маркується МТ), що завдяки впливу наклепу має високу

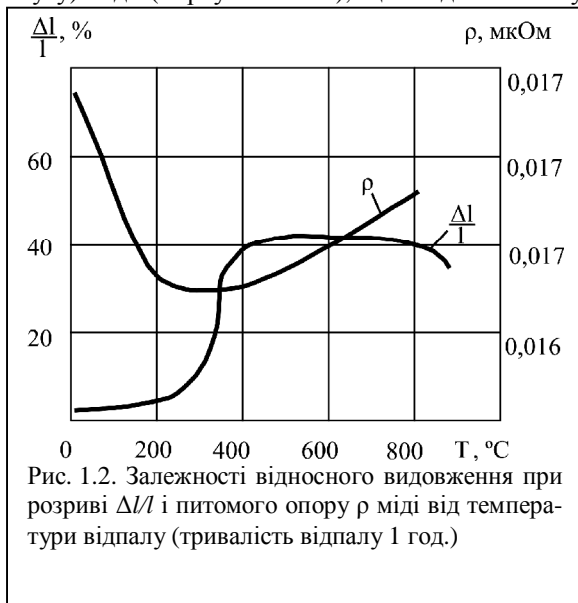


Рис. 1.2. Залежності відносного видовження при розриві $\Delta l/l$ і питомого опору ρ міді від температури відпалу (тривалість відпалу 1 год.)

межу міцності при розтягуванні і мале відносне видовження, а також твердість і пружність при вигинанні; дріт із твердої міді трохи пружинить.

Якщо ж мідь піддати відпалу, тобто нагріванню до кількох сотень градусів із наступним охолодженням, то вийде м'яка (відпалена) мідь (маркується ММ), що порівняно пластична, має

малу твердість і невелику міцність, але дуже велике відносне видовження при розриві і (у відповідності з розглянутими загальними зако-

номірностями) більш високу питому провідність. Відпал міді роблять у спеціальних печах без доступу повітря, щоб уникнути окиснення. Вплив відпалу на властивості міді ілюструє рис. 1.2, з якого видно, що зміна механічних властивостей при відпалі виявляється більш різкою, ніж зміна питомого опору.

Стандартна мідь, стосовно якої виражають у відсотках питомі провідності металів і сплавів у відпаленому стані при 20°C, має питому провідність 58 МСм/м, тобто $\rho = 0,017241$ мкОм·м.

1.2.1.2. Марки міді

Серед марок стандартної міді як провідниковий матеріал використовують мідь М1 і М0. Маркування зроблене по вмісту домішок в основному металі. Так, мідь М1 містить 99,90% Cu, а в загальній кількості домішок (0,10%) кисню повинно бути не більш 0,08%. Кисень є однією з найбільш шкідливих домішок у міді. При підвищеному його вмісті помітно погіршуються механічні й технологічні властивості міді, а також утруднюється пайка. Мідь, що містить більш 0,1% кисню, легко руйнується при гарячій обробці тиском.

Кращими механічними властивостями володіє мідь М0 (99,95% Cu), у складі якої міститься не більше 0,05% домішок, у тому числі не більше 0,02% кисню. Таку мідь одержують шляхом спеціального режиму плавки. З міді М0 можна виготовити найбільш тонкий дріт.

1.2.1.3. Спеціальні сорти міді

В електровакуумній техніці застосовують сорти міді, що не містять кисню. Їх одержують з електролітичної міді, переплавленої у захисній атмосфері відновлюючого газу СО. Кисень, що виділяється при нагріванні міді вступає в реакцію із закисом вуглецю і видаляється у виді вуглекислого газу. Краща безкиснева мідь містить 99,97% Cu. Ще більш чистим металом є вакуумна мідь, виплавлена у вакуумних індукційних печах у графітових тиглях при залишковому тиску газу порядку 10^{-3} Па. Вона може містити 99,99% Cu. Вільна від кисню мідь за механічною міцністю й електричною провідністю мало відрізняється від електролітичної міді, переплавленої звичайним способом. Її суттєвою перевагою є висока пластичність.

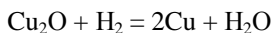
1.2.1.4. Властивості міді

Питома провідність міді дуже чутлива до наявності домішок. Так, при вмісті у міді 0,5% домішки Zn, Cd чи Ag питома провідність її знижується на 5%. При тому ж вмісті Ni, Sn чи Al питома провідність міді падає на 25%. Ще більш сильний вплив роблять домішки Be, As, Fe, Si і P, що знижують її питому провідність на 55% і більше. У той

же час присадки багатьох металів підвищують механічну міцність і твердість міді як у холоднотягнутому, так і у відпаленому станах.

Недоліком міді є її схильність до атмосферної корозії з утворенням оксидних і сульфідних плівок. Швидкість окиснення швидко зростає при нагріванні, однак міцність зчеплення оксидної плівки з металом невелика. Внаслідок окиснення мідь непридатна для слабкострумових контактів. При високій температурі в електричній дузі оксид міді дисоціює, оголюючи металічну поверхню. Металеве відшарування і термічне розкладання оксидної плівки викликає підвищене зношення мідних контактів при сильних струмах.

Значний вплив на механічні властивості міді робить водень. Після водневого відпалу твердість міді може зменшитися в кілька разів. Руйнівна дія водню позначається особливо сильно при наявності кисню, що присутній у технічній міді у виді закису Cu_2O . Водень, легко проникає в глиб металу при підвищених температурах і вступає в реакцію:



Тиск водяної пари, що утворюється в металі, через незначну швидкість її дифузії може досягати декількох тисяч атмосфер. Це призводить до утворення мікротріщин, що порушують вакуумну щільність матеріалу і надають йому крихкості. У виробництві це явище називають водневою хворобою.

У міді, що містить менше 0,001% кисню, „водневої хвороби” практично немає. Однак і в безкисневій міді після термообробки у водні може спостерігатися погіршення пластичності при підвищених температурах (300–800°C). Справа в тому, що при нагріванні відбувається розпад твердого розчину водню в міді. Газ, що виділяється, знаходячись під великим тиском, розриває метал і скраплюється, головним чином, на границях зерен. При розтяганні ці місця стають слабкими ділянками.

1.2.1.5. Застосування міді

Мідь застосовують в електротехніці для виготовлення проводів, кабелів, шин розподільних пристроїв, обмоток трансформаторів, електричних машин, струмоведучих деталей приладів і апаратів, анодів в гальваностегії і гальванопластиці. Мідні стрічки використовують як екрани кабелів. Тверду мідь застосовують у тих випадках, коли необхідно забезпечити особливо високу механічну міцність, твердість і опір стиранню, наприклад, для виготовлення неізольованих проводів. Якщо ж потрібна гарна гнучкість і пластичність, а межа міцності на розтяг не має істотного значення, то переважно використовується м'яка мідь (наприклад, для монтажних проводів і шнурів). Зі спеціаль-

них електровакуумних сортів міді виготовляють деталі клістронів, магнетронів, аноди потужних генераторних ламп, виводи енергії приладів НВЧ, деякі типи хвилеводів і резонаторів. Крім того, мідь використовують для виготовлення фольгованого гетинаксу і застосовують у мікроелектроніці у вигляді осаджених на підкладки плівок, що відіграють роль провідних з'єднань між функціональними елементами схеми.

Незважаючи на великий коефіцієнт лінійного розширення в порівнянні з коефіцієнтом розширення скла, мідь застосовують для спаїв із склою, оскільки вона володіє чудовими властивостями: низькою границею текучості, м'якістю і високою теплопровідністю. Для впаювання в скло мідному електроду надають спеціальну форму у виді тонкого рантика, завдяки чому такі спаї називають рантовими.

1.2.2. Алюміній

1.2.2.1. Порівняння властивостей алюмінію й міді

Другим за значенням (після міді) провідниковим матеріалом є алюміній – метал сріблясто-білого кольору, найважливіший з так званих легких металів. Питомий опір алюмінію в 1,6 рази більший питомого опору міді, але алюміній у 3,5 рази легший міді. Завдяки малій густині забезпечується велика провідність на одиницю маси, тобто при однаковому опорі й однаковій довжині алюмінієві проводи у два рази легші мідних, незважаючи на більший поперечний переріз. До того ж у порівнянні з міддю алюміній набагато більше розповсюджений у природі і характеризується меншою вартістю. Відзначені обставини обумовлюють широке застосування алюмінію в електротехніці.

Недоліком алюмінію є його низька механічна міцність. Відпалений алюміній у три рази менш міцний на розрив, ніж відпалена мідь.

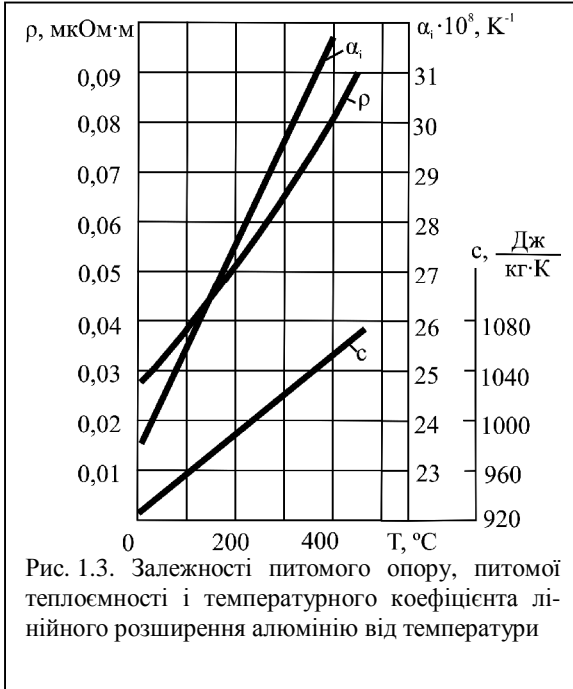
Алюміній одержують електролізом глинозему Al_2O_3 у розплаві кріоліту Na_3AlF_6 при температурі $950^\circ C$.

1.2.2.2. Марки алюмінію

Для електротехнічних цілей використовують алюміній технічної чистоти АЕ, що містить не більше 0,5% домішок. Виготовлений з алюмінію АЕ і відпалений при температурі $350 \pm 20^\circ C$ дріт має питомий опір при $20^\circ C$ не більший за 0,0280 мкОм·м. Алюміній високої чистоти А97 (не більше 0,03% домішок) застосовують для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів і корпусів електролітичних конденсаторів. В алюмінію особливої чистоти А999 домішки не перевищують 0,001%. Чистоту його контролюють за значенням залишкового пито-

мого опору при температурі рідкого гелію, що не повинен перевищувати $0,000004$ мкОм·м.

Різні домішки по-різному знижують питому провідність алюмінію. Добавки таких домішок, як нікель, кремній, цинк, залізо, миш'як, сурма, свинець і вісмут у кількості $0,5\%$ знижують питому провідність



алюмінію у відпаленому стані не більше, ніж на 2–3%. Більш помітну дію чинять домішки міді, срібла і магнію, що знижують її на 5–10% при такому ж вмісті по масі. Дуже сильно знижують питому провідність алюмінію добавки ванадію, титану й марганцю. Можна сказати, що домішки, які не утворюють твердих розчинів з алюмінієм, мало впливають на його електричну провідність, а домішки, що утворюють твердий розчин, помітно знижують її; виключенням є цинк. Загартування збільшує опір алюмінію в присутності тих домішок, що збільшують свою розчинність при нагріванні. У технічному алюмінії головними домішками є кремній і залізо.

Прокатку, протягування й відпал алюмінію роблять аналогічно як і для міді. З алюмінію шляхом прокатки можна одержувати дуже тонку (6–7 мкм) фольгу, що застосовується в якості обкладок у паперових конденсаторах чи пластин конденсаторів змінної ємності.

Залежність деяких фізичних властивостей алюмінію від температури показана на рис. 1.3. Цікаво відзначити, що при температурі рідкого азоту за значенням питомого опору алюмінію майже зрівняється з міддю, а при більш низьких температурах питомий опір алюмінію

Залежність деяких фізичних властивостей алюмінію від температури показана на рис. 1.3. Цікаво відзначити, що при температурі рідкого азоту за значенням питомого опору алюмінію майже зрівняється з міддю, а при більш низьких температурах питомий опір алюмінію

стає меншим ніж у міді. Тому перспективним є використання алюмінію в якості кріопровідника.

1.2.2.3. Поверхня алюмінію

Алюміній активно окиснюється і покривається тонкою плівкою оксиду з великим електричним опором. Така плівка захищає алюміній від корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів, що унеможлиблює пайку алюмінію звичайними методами. Тому для пайки алюмінію застосовують спеціальні пастиприпої або використовують ультразвукові паяльники.

Більш товстий шар оксиду, що створює надійну електричну ізоляцію на порівняно високі напруги, одержують за допомогою електрохімічної обробки алюмінію.

Оксидна ізоляція механічно міцна й температуростійка, вона може бути порівняно тонкою (шар оксиду товщиною 0,03 мм має пробивну напругу порядку 100 В, а товщиною 0,04 мм близько 250 В).

З оксидованого алюмінію виготовляють різні котушки без додаткової міжвиткової й міжшарової ізоляції. Недоліками оксидної ізоляції проводів є її обмежена гнучкість (особливо при великій товщині шару оксиду) і помітна гігроскопічність (у тих випадках, коли не потрібно великої нагрівостійкості оксидної ізоляції, її покривають лаком).

Найбільш широке застосування оксидна ізоляція одержала в електролітичних конденсаторах; її використовують також у деяких типах випрямлячів і розрядників.

На практиці важливе значення має питання захисту від гальванічної корозії в місцях контакту алюмінію й міді. Якщо область контакту піддається впливу вологи, то виникає місцева гальванічна пара з досить високим значенням е.р.с., причому полярність цієї пари така, що на зовнішній поверхні контакту струм спрямований від алюмінію до міді, унаслідок чого алюмінієвий провідник може бути сильно зруйнований корозією. Тому місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні бути ретельно захищені від зволоження (їх покривають лаками і т.п.).

Плівки алюмінію широко використовують в інтегральних мікросхемах як контакти і в якості міжз'єднань. Останні забезпечують зв'язок між окремими елементами схеми і зовнішніми приєднаннями. Нанесення плівок на кремнієві пластинки виконують методом випаровування й конденсації у вакуумі. Необхідний рисунок міжз'єднань створюється за допомогою фотолітографії. Переваги алюмінію як контактного матеріалу полягають у тому, що цей матеріал легко напилюється, має гарну адгезію до кремнію і плівкової ізоляції з SiO_2 , широко використовуваної у напівпровідникових інтегральних схемах. До того

ж алюміній утворює гарні омичні контакти з кремнієм. Недоліком алюмінію є значна схильність до електроміграції, що спричиняє збільшення опору або навіть розрив міжз'єднань.

1.3. Надпровідні матеріали

1.3.1. Надпровідні метали і сплави

Явище надпровідності при криогенних температурах досить поширене в природі. Надпровідністю володіють 26 металів. Більшість із них є надпровідниками I роду з критичними температурами переходу нижче 4,2 К. У цьому полягає одна з причин того, що більшість надпровідних металів для електротехнічних цілей застосувати не вдається. Ще 13 елементів виявляють надпровідні властивості при високих тисках. Серед них такі напівпровідники як кремній, германій, селен, телур, сурма й ін. Варто помітити, що надпровідністю не володіють метали, що є найкращими провідниками в нормальних умовах. До них відносяться золото, мідь, срібло. Малий опір цих матеріалів вказує на слабку взаємодію електронів із граткою. Така слабка взаємодія не створює поблизу абсолютного нуля достатнього міжелектронного притягання, здатного перебороти кулонівське відштовхування. Тому і не відбувається їхній перехід у надпровідний стан. Крім чистих металів надпровідністю володіють багато з інтерметалічних сполук і сплавів. Загальна кількість найменувань відомих у даний час надпровідників складає близько 2000. Серед них найвищими критичними параметрами володіють сплави й сполуки ніобію. Деякі з них дозволяють використовувати для досягнення надпровідного стану замість рідкого гелію більш дешевий холодоагент – рідкий водень.

Усі інтерметалічні сполуки й сплави відносяться до надпровідників II роду. Однак розподіл речовин за їх надпровідними властивостями на два види не є абсолютним. Будь-який надпровідник I роду можна перетворити в надпровідник II роду, якщо створити у ньому достатню концентрацію дефектів кристалічної ґратки. Наприклад, для чистого олова $T_{ин} = 3,7$ К, але якщо викликати в олові різку неоднорідну механічну деформацію, то критична температура зростає до 9 К, а критична напруженість магнітного поля збільшиться в 70 разів.

Надпровідність ніколи не спостерігається в системах, у яких існує феро- чи антиферромагнетизм. Утворенню надпровідного стану у напівпровідниках і діелектриках перешкоджає мала концентрація вільних електронів. Однак, у матеріалах із великою діелектричною проникністю сили кулонівського відштовхування між електронами значною мірою ослаблені, тому деякі з них також виявляють властивості надпровідників при низьких температурах. Прикладом може служити ти-

танат стронцію (SrTi_3), що відноситься до групи сегнетоелектриків. Ряд напівпровідників вдається перевести у надпровідний стан додаванням великої концентрації легуючих домішок (GeTe , SnTe , Cu та ін.).

В даний час промисловість випускає широкий асортимент надпровідних дротів і стрічок для різних цілей. Виготовлення таких провідників пов'язано з великими технологічними труднощами. Вони обумовлені поганими механічними властивостями надпровідників, їхньою низькою теплопровідністю і складною структурою проводів. Особливо великою крихкістю відрізняються інтерметалічні сполуки з високими критичними параметрами. Тому замість простих дротів і стрічок доводиться створювати композиції з двох (зазвичай надпровідник із міддю) і навіть декількох металів. Для одержання багатожильних проводів із крихких інтерметалідів особливо перспективний бронзовий метод (або метод твердофазної дифузії), освоєний промисловістю. Цим методом пресування й волочіння створюється композиція з тонких ниток ніобію в матриці з олов'яної бронзи. При нагріванні олово з бронзи дифундує в ніобій, утворюючи на його поверхні тонку надпровідну плівку станіду ніобію Nb_3Sn . Такий джгут може згинатися, але плівки залишаються цілими.

1.3.2. Високотемпературні надпровідні матеріали

На шляху до практичного використання надпровідних матеріалів тривалий час існувала непереборна перешкода – вкрай низька температура переходу в надпровідний стан. За 75 років, що пройшли з часу відкриття Камерлінг-Оннеса, цю температуру вдалося підняти лише до 23,2 К на інтерметаліді Nb_3Ge , причому загальноновизнані теорії надпровідності (БКШ) породжували невіру в принципову можливість подолання цього температурного бар'єру.

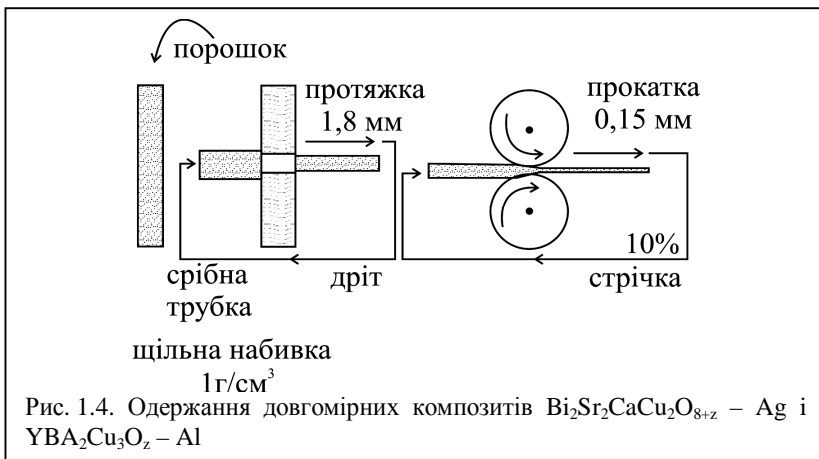
У 1986 р. Беднорц і Мюллер виявили здатність кераміки на основі оксидів міді, лантану і барію ($\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$) переходити в надпровідний стан при 30 К. Складні купрати аналогічного складу були синтезовані в 1978 р. Лазаревим, Кахан і Шаплигінім, а також французькими дослідниками двома роками пізніше. На жаль, електропровідність цих зразків була вимірjana лише до температури кипіння рідкого азоту (77 К), що не дозволило виявити ефект надпровідності. Найважливішою рисою відкриття високотемпературної надпровідності можна назвати те, що надпровідність була виявлена не у традиційних інтерметалідів, органічних або полімерних структурах, а у оксидної кераміки, що зазвичай проявляє діелектричні або напівпровідникові властивості. Це зруйнувало психологічні бар'єри і дозволило в перебігу ко-

роткого часу створити нові, більш довершені покоління металоксидних НП майже одночасно в США, Японії, Китаї і Росії.

У 1987 р. Чу і ін. синтезують, використовуючи ідею "хімічного стиснення" для модифікування структури, надпровідну кераміку з оксидів барію, ітрію і міді $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ з критичною температурою 93 К, тобто вище за точку кипіння рідкого азоту. У 1988 р. Маєда і ін. синтезують серію сполук складу $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$, серед яких фаза з $n = 3$ має $T_c = 108$ К. Місяць опісля Шенг і Херман отримали надпровідник $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ з $T_c = 125$ К. У 1993 р. Антіпов, Путілін і ін. відкрили ряд ртутьвмісних надпровідників складу $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+d}$ ($n = 1-6$). В даний час фаза $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$ має найбільше відоме значення критичної температури (135 К), причому при зовнішньому тиску 350 тисяч атмосфер температура переходу зростає до 164 К, що лише на 19 К поступається мінімальній температурі, зареєстрованій в природних умовах на поверхні Землі. Всього до теперішнього часу відомо близько 50 оригінальних шаруватих купратів.

Практично всі відомі на даний час високотемпературні надпровідні матеріали є складними шаруватими оксидами, що містять мідь. Відповідальним за надпровідність в купратах вважають саме шар CuO_2 , в якому атоми міді утворюють квадратну сітку і розташовуються в її вузлах, тоді як атоми кисню знаходяться на лініях, що сполучають ці вузли. Надпровідність при температурах нижче критичної виникає при "легуванні" шарів CuO_2 оптимальною кількістю носіїв заряду, яке відбувається при впорядкуванні кисневих атомів і вакансій після досягнення високотемпературною надпровідною фазою певної кисневої стехіометрії, при гетеровалентному легуванні, під дією зовнішнього тиску і т.д.. Експериментально встановлено, що для виникнення надпровідності необхідно, щоб формальний ступінь окиснення міді в цих шарах з узагальненими електронами не дуже відрізнявся від +2 і знаходилася в діапазонах від +2,05 до +2,25 (діркові надпровідники) або від +1,8 до +1,9 (електронні надпровідники). Іншим важливим параметром, що визначає надпровідні властивості, є довжина зв'язку між атомами міді і кисню. В структурах надпровідних купратів реалізуються нерівноцінні хімічні зв'язки: сильні зв'язки в площині CuO_2 і значно слабші – перпендикулярно до цих шарів. Як наслідок, ці структури є шаруватими, тоді як каркасні складні оксиди міді з хімічними зв'язками, рівноцінними в трьох напрямках, не є надпровідниками.

Одним з найбільш типових прикладів промислових надпровідних композитів є високотемпературні надпровідні стрічки в срібній оболонці. Кожна така стрічка складається з надпровідного стержня, оточеного металевою оболонкою. На рис. 1.4 наведена схема одер-



жання таких стрічок. Для запобігання терморезистивній нестійкості, створюють багатожильні проводи, в яких зникнення надпровідності із-за локального перегріву вище температури переходу в надпровідний стан викличе обтікання резистивної ділянки по сусідніх надпровідних жилах.

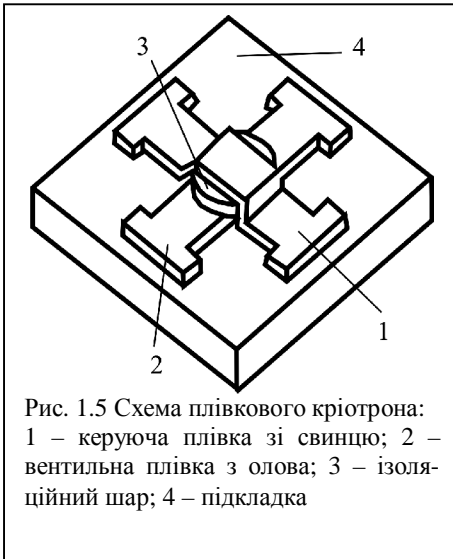
Як матеріал надпровідної жили зазвичай використовують високотемпературні надпровідники, що містять вісмут або, рідше, талій.

1.3.3. Застосування надпровідників

Надпровідні елементи і пристрої знаходять усе більш широке застосування у різних галузях науки й техніки. Розроблено великомасштабні довгострокові програми промислового використання великомасштабної надпровідності.

Одне з головних застосувань надпровідників пов'язано з одержанням надвеликих магнітних полів. Надпровідні соленоїди дозволяють одержувати однорідні магнітні поля напруженістю понад 10^7 А/м у достатньо великій ділянці простору, у той час як межею звичайних електромагнітів із залізними осерддями є напруженість порядку 10^6 А/м. До того ж у надпровідних магнітних системах циркулює незатухаючий струм, тому не потрібне зовнішнє джерело живлення. Сильні магнітні поля необхідні при проведенні наукових досліджень. Надпровідні соленоїди дозволяють значною мірою зменшити габарити і споживання енергії у синхрофазотронах і інших прискорювачах елементарних часток. Перспективне використання надпровідних магнітних систем для утримання плазми в реакторах керованого термоядерного синтезу, у магнітогідродинамічних (МГД) перетворювачах тепло-

вої енергії в електричну, як індуктивні нагромаджувачі енергії для покриття пікових потужностей у масштабах великих енергосистем. Широкий розвиток одержують розробки електричних машин із надпровідними обмотками збудження. Застосування надпровідників дозволяє виключити з машин осердя з електротехнічної сталі, завдяки чому зменшується в 5–7 разів їхня маса і габаритні розміри при збереженні потужності. Економічно обґрунтоване створення надпровідних трансформаторів, розрахованих на високий рівень потужності (десятьсотні мегават). Значна увага в різних країнах приділяється розробці надпровідних ліній електропередач на постійному й змінному струмах.



Розроблені дослідні зразки імпульсних надпровідних котушок для живлення плазмових гармат і систем нагачування твердотільних лазерів. У радіотехніці починають використовувати надпровідні об'ємні резонатори, що володіють, завдяки мізерно малому електричному опорі, дуже високою добротністю. Принцип механічного виштовхування надпровідників із магнітного поля покладено в основу створення надшвидкісного залізничного транспорту на „магнітній подушці”.

Порушення надпровідності матеріалу зовнішнім магнітним полем використовується в конструкції приладу, що називають кріотроном. На рис. 1.5 схематично зображено пристрій плівкового кріотрона. В умовах $T < T_{mн}$ плівка з олова залишається надпровідною доти, поки магнітне поле, створюване струмом, пропущеним через свинцевий надпровідник, не перевищить критичного для олова значення. На кріотронних елементах можна виконати комірки обчислювальних машин. З кріотронів можна зібрати будь-яку схему пам'яті чи переключення. Два стани з нульовим і кінцевим опором природно ототожнювати з позиціями 0 і 1 у двійковій системі числення. Перевагами комірок на плівкових кріотронах є висока швидкодія, малі втрати і надзвичайна компактність.

Широкі перспективи застосування надпровідників відкриває вимірювальна техніка. Доповнюючи можливості наявних вимірювальних засобів, надпровідні елементи дозволяють реєструвати дуже тонкі фізичні ефекти, вимірювати з високою точністю й обробляти велику кількість інформації.

Уже зараз на основі надпровідності створені високочутливі болометри для реєстрації ІЧ-випромінювання, магнітометри для вимірювання слабких магнітних потоків, індикатори надмалих напруг і струмів. Коло цих приладів постійно розширюється.

Можливості практичного використання надпровідників значно зросли після створення високотемпературних надпровідних матеріалів. За роки існування високотемпературних надпровідних матеріалів критичні струми і розміри стрічок з високими надпровідними характеристиками виростили на порядки, що дозволяє говорити про реальні можливості їх практичного застосування, зокрема для створення надпотужних магнітів і ліній бездисипативної передачі енергії. Стрічки в срібній оболонці вже можуть випускатися багатьма компаніями на промисловій основі і в об'ємі (багато кілометрів), достатньому для більшості застосувань, і обмежує цей процес поки що їх висока вартість. Проте, багато пілотних проєктів і тестові лінії вже діють.

Література

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1990. – 306 с.
2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
3. Материалы микроэлектронной техники. Под ред. В.М. Андреева. – М.: Радио и связь, 1989. – 350 с.
4. Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А. Материалы электронной техники. Задачи и вопросы. – СПб.: Лань, 2003. – 208 с.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Пер. с англ. под ред. А.А. Гусева. – М.: Наука, 1978. – 792 с.
6. Буккель В. Сверхпроводимость. Основы и приложения / Пер. с нем. – М.: Мир, 1975. – 368 с.
7. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. – М.: Наука, 1982. – 240 с.
8. Дмитренко И.М. В мире сверхпроводников. – К.: Наукова думка. – 1981. – 194 с.
9. Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников. Под ред. Д.М. Гинзберга. – М.: Мир, 1990. – 540 с.

10. Планида Н.В., Высокотемпературные сверхпроводники. – М.: Наука, Физматгиз, 1993. – 288 с.
11. Лихарев К.К., Семенов В.К., Зорин А.Б. Новые возможности для сверхпроводящей электроники // Итоги науки и техники, сер. Сверхпроводимость. – 1988. – Том 1. – С. 1–74.
12. Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Химические принципы получения металлоксидных сверхпроводников // Успехи химии. – 2000. – Т. 69. – №. 1. – С. 3–40.

Питання для самоперевірки

1. Як можна класифікувати провідникові матеріали?
2. Які властивості міді обумовлюють її широке застосування в електронній техніці? Що таке „воднева хвороба„ міді?
3. Якими перевагами й недоліками в порівнянні з міддю володіє алюміній як провідниковий матеріал?
4. Які метали й у яких умовах можуть переходити в стан надпровідності? Що є причиною утворення куперовських пар?
5. Як впливає магнітне поле на критичну температуру переходу в стан надпровідності? Чим відрізняються надпровідники першого і другого роду?
6. Що таке високотемпературна надпровідність?