#### **Зміст**

1. Вступ.
2. Надпровідники: історія розвитку, сучасний стан і перспективи.
3. Відкриття явища надпровідності.
4. Ідеальний провідник і надпровідник. Ефект Мейснера.
5. Надпровідники першого та другого роду.
6. Ефект Джозефсона.
7. Високотемпературна надпровідність.
8. Критичні стани:

8.1. Критичні магнітні поля.

8.2. Критичний струм.

8.3. Критична температура.

1. Застосування надпровідності.
2. Висновки.
3. Список використаних джерел.

1. Вспуп.

*Надпровідність* – фізичне явище, що спостерігається в деяких речовинах (надпровідниках). При охолодженні їх нижче певної критичної температури *T*с зникає електричний опір і виштовхується магнітне поле із об’єму надпровідника.

Явище було відкрито в 1911 році Каммерлінг-Оннесом. Вивчаючи залежність опору ртуті від температури, він помітив, що при температурі нижче 4,2 К ртуть практично втрачає опір.

Вивчаючи це явище, вчені відкрили ефекти, які притаманні надпровідникам: *ефект Мейсера* *і* *ефект Джозефсона*. Надпровідники за своїми магнітними властивостями були розділені на два класи: надпровідники *першого* та *другого роду*. Також вченими було встановлено, що надпровідність можна отримати при температурах набагато вищих за абсолютний нуль (*високотемтературна надпровіднідність*), що полегшило впровадження цього явища до практичного застосування.

#### 2. Надпровідники: історія розвитку, сучасний стан і перспективи.

Явище, що полягає в повному зникненні електричного опору провідника при його охолоджуванні нижче критичної температури, було відкрите нідерландським фізиком Х.Камерлінг-Оннесом в 1911 році, а задовільне пояснення, відмічене іменами американських фізиків Л.Купера, Дж.Бардина, Дж. Шриффера, радянського математика і фізика Н.Н.Боголюбова, отримало практичне використання цього явища в середині шестидесятих років, після того, як були розроблені надпровідні матеріали, придатні для технічних застосувань.

Істотним етапом в дослідженні надпровідності виявився 1933 рік, коли В. Мейснером В. і Р. Оксенфельдом було вперше встановлено, що при температурі нижче критичної магнітне поле повністю виштовхується з надпровідника. Це явище тепер називають *ефектом Мейснера*. Як показано на малюнку, якщо, наприклад, охолодити до температури, нижче за температуру надпровідного переходу, силові лінії магнітного поля повністю виштовхуються з кулі. Надпровідне тіло володіє властивостями, як би зворотними феромагнітному: залізний магніт концентрує силові лінії магнітного поля, а надпровідник виштовхує їх.

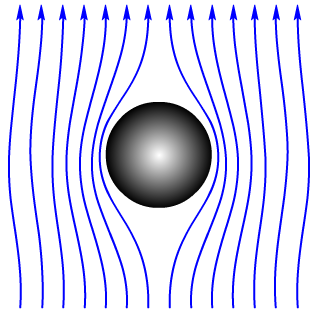


Рис. 1

На наступному малюнку демонструється ефект Мейсснера - фундаментальна властивість надпровідного стану. Магнітна пігулка плаває над увігнутою чашею з надпровідника. Магнітне поле пігулки викликає електричні струми в тонкому шарі на поверхні надпровідної чаші. Ці струми у свою чергу створюють магнітне поле, протилежне полю магніта і компенсуюче поле магніта усередині матеріалу чаші. Таким чином магнітне поле повністю виштовхується з надпровідника, а сам магніт покоїться на «подушці» зі свого власного поля. Це явище отримала назва «Труна Магомета», бо за переказами труна Магомета висіла в просторі без всякої підтримки. Цей ефект часто використовується для демонстрацій явища надпровідності.

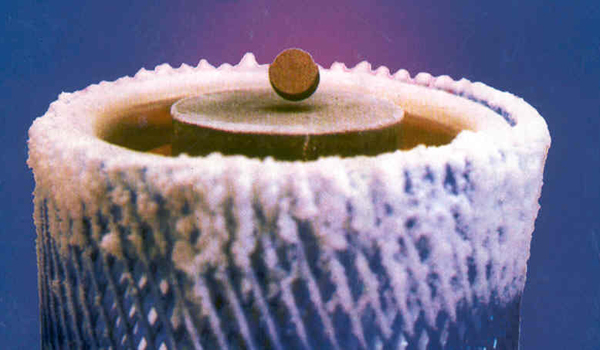


Рис. 2

Якщо проаналізувати розвиток досліджень по надпровідності, то виразно видно наступна тенденція: спочатку вивчалася надпровідність простих металів (Hg, Pb, Nb), потім подвійних (Nb3Sn, Nb3Ge) і потрійних (Nb3(Al,Ge)) интерметалідів. В рамках такого підходу вибирані композиції були в якійсь мірі логічним продовженням простих металів. У рекордсмена - з'єднання Nb3Ge - величина критичної температури складала 23,2 К. Температурний інтервал існування надпровідності лише наблизився до температур кипіння рідкого водню і рідкого неону, і фактично для перекладу матеріалів в надпровідний стан використовувався дорогий і технічно важкий в експлуатації холодагент - рідкий гелій. Заповітною межею для критичної температури завжди була температура кипіння рідкого азоту (77 К) - дешевого і доступного холодагента, вироблюваного промисловістю у великих кількостях.

У 1986 р. азотна межа була перевершена - І. Г. Беднорцем и К. А. Мюллером були відкриті високотемпературні надпровідники (скорочено ВТНП), критична температура у яких лежить, як правило, вище за температуру кипіння рідкого азоту. Основою цих з'єднань служать оксиди міді, і тому вони також часто називаються купратами або металооксидами. У дослідження метало оксидних надпровідників і пошук на цьому шляху нових надпровідних матеріалів включилася після відкриття Беднорца і Мюллера вся наукова громадськість миру. У 1987 р. на кераміку YBa2Cu3O7-x була досягнута температура надпровідного переходу 92 К, потім температура надпровідного переходу була піднята до 125 К в з'єднаннях талія. Найбільша критична температура, досягнута за більш ніж 15 років досліджень ВТНП, належить з'єднанням на основі ртуті і рівна 145 К.

Надпровідність керамік, можливо, пояснюється взаємодією електронів з іншими квазічастинками.У надпровідності три «вороги»: високі температури, сильні магнітні поля і великі струми. Якщо їх величини перевищать граничні значення, звані критичними, надпровідність зникає, надпровідник стає звичайним провідником. По взаємодії з магнітним полем надпровідники діляться на дві основні групи: надпровідники I-го і II-го роду.

Надпровідники першого роду при приміщенні їх в магнітне поле «виштовхують» останнє так, що індукція усередині надпровідника рівна нулю (ефект Мейсснера) .Напруженість магнітного поля, при якому руйнується надпровідність і поле проникає всередину провідника, називається критичним магнітним полем Нк.У надпровідників другого роду існує проміжок напруженості магнітного поля Нк2 > Н > Нк1, де індукція усередині надпровідника менша індукції провідника у нормальному стані. Нк1 - нижнє критичне поле, Нк2 - верхнє критичне поле. Коли Н < Нк1 - індукція в надпровіднику другого роду рівна нулю, а при Н > Нк2 - надпровідність порушується.

Табл.1. Tk, Нк1, Нк2, деяких металів і з'єднань:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Речовина** | **Тк, К** | **μ0Нк1, Тл** | **μ0Нк2, Тл** |
| **Pb** | **7.2** | **0.55** |  |
| **Nb** | **9.2** | **0.13** | **0.27** |
| **Te** | **7.8** |  |  |
| **V** | **5.3** |  |  |
| **Ta** | **4.4** |  |  |
| **Sn** | **3.7** |  |  |
| **V3Si** | **17.1** |  | **23.4** |
| **Nb3Sn** | **18.2** |  | **24.5** |
| **Nb3Al** | **18.9** |  |  |
| **Nb3Ga** | **20.3** |  | **34.0** |
| **Nb3Ge** | **23.0** |  | **37.0** |
| **(Y0.6Ba0.4)2CuO4** | **96** |  | **160±20** |
| **Y1.2Ba0.3CuO4-8** | **102** |  | **18 при 77К** |

Американський фізик У.Літлл в 1964 році висунув сміливе припущення: можливі надпровідники не металевої, а органічної природи. Важливе місце в своїх міркуваннях Літлл відводив полімерним молекулам, в основному ланцюзі яких є одиничні і кратні зв'язки, що чергуються (хіміки називають такі зв'язки зв'язаними). Цю особливість зв'язаних зв'язків в основному ланцюзі полімерної молекули Літлл вважав важливою передумовою для переходу в надпровідний стан. Склавши проект свого полімеру, учений вважав: речовина з такими молекулами зобов'язана бути надпровідником; більш того - в цей стан вона повинна переходити при не дуже низькій температурі, можливо, близькою до кімнатної.

Провідники, вільні від всяких енергетичних втрат за абсолютно звичайних умов, звичайно ж, зробили б революцію в електротехніці. Ідея американського фізика була підхоплена в багатьох лабораторіях різних країн.

Проте досить швидко з'ясувалося, що придуманий приклад Літллом ніяким чином не давав можливості перейти в надпровідний стан. Але надпровідність була таки виявлена за межами світу металів. У 1980 році в Данії група дослідників під керівництвом До. Бекгарда, эксперементуючи з органічною речовиною з класу іон-радикальних солей, перевела його в надпровідний стан при тиску 10 кбар і температурі на 0,9 градуса вище за абсолютний нуль. У 1983 році колектив радянських фізиків, очолюваний доктором фізико-математичних наук І.Ф. Щегольовим, добився від речовини того ж класу переходу в надпровідний стан вже при 7 градусах абсолютної шкали температур і при нормальному тиску.

#### 3. Відкриття надпровідності.

*Камерлінг-Оннес. Біографія****.***

Нідерландський фізик. Камерлінг-Оннес вважав, що дослідження поведінки газів при низьких температурах може дати важливу інформацію для перевірки теорії відповідних станів. Для досягнення низьких температур необхідно зріджувати гази. Камерлінг-Оннес вибрав темою для роботи своєї лабораторії вузьку область кріогеники - дослідження низькотемпературних ефектів. Він побудував крупний завод по зріджуванню газів для отримання великих кількостей низькотемпературних рідин - кисню, азоту і повітря. Ці рідини були необхідні для проведення експериментів по вивченню властивостей матеріалів і досягнення ще нижчих температур. У 1908 році Камерлінгу-Оннесу вперше вдалося отримати рідкий гелій при температурі всього лише на 4 градуси вище за абсолютний нуль. Він вивчав спектри поглинання елементів, фосфоресценцію різних з'єднань, в'язкість зріджених газів і магнітні властивості речовин.

Своє найбільш вражаюче відкриття Камерлінг-Оннес зробив в 1911. Він виявив, що при низьких температурах електричний опір деяких металів повністю зникає. Це явище Камерлінг-Оннес назвав надпровідністю. Камерлінг-Оннес припустив, що пояснення надпровідності буде дано квантовою теорією. У 1957 Дж. Бардін, Л. Купер і Дж. Роберт Шріффер запропонували теоретичне пояснення явища надпровідності. Камерлінг-Оннес був удостоєний Нобелівської премії по фізиці 1913 «за дослідження властивостей речовини при низьких температурах, які привели до виробництва рідкого гелію».

#### *Дослід Камерлінг-Оннеса: відкриття надпровідності.*

Явище надпровідності є незвичайно яскравим проявом квантових закономірностей в макроскопічних масштабах. Надпровідність - це перебіг електричного струму по провідникові без опору. Пропадає опір у надпровідників при деякій температурі, званою критичною температурою, і залишається нульовим аж до температури абсолютного нуля.

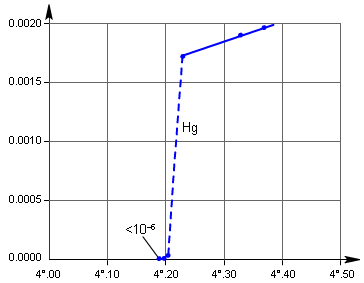


Рис. 3. Залежність питомого опору ртуті від температури

В даний час встановлено, що в надпровідному стані питомий опір надпровідників принаймі менше 10 – 21 Ом∙м, тобто в 10 – 17 разів менше опору міді при кімнатній температурі. Як видно з рис. 3, перехід з нормального в надпровідний стан відбувається дуже різко при критичній температурі. Як це задоволено часто буває, до відкриття явища надпровідності привів випадок. У 1908 році Камерлінг-Оннес вперше отримав рідкий гелій, і потім почав дослідження залежності опору різних чистих металів від температури. Спочатку це була платинова і золота тяганина, і їх опори, як і очікувалося, зменшувалися у міру зменшення температури, потім він приступив до вимірювання опору ртуті. Вибрана вона була тому, що ртуть можна дуже добре очистити від домішок шляхом вакуумної дистиляції, тобто просто кип'яченням. Все йшло як завжди при температурах рідкого кисню, азоту, водню, але в рідкому гелії опір впав до нуля. Цілком природно було припустити, що відбувається коротке замикання вимірювального ланцюга десь в кріостаті (приладі типу термоса, в якому проводяться експерименти з охолоджувальними рідинами (їх називають холодагентами) - азотом, воднем, гелієм). Вимірювання повторювали кілька разів, але весь час при температурі рідкого гелію ланцюг закорочувався. Тоді було вирішено замість U-подібної трубки, заповнюваною ртуттю, використовувати W-подібну і розмістити в ній вже декілька контактів. На жаль, до засмучення експериментаторів, вже тепер всі чотири сегменти закорочувалися. І лише випадок допоміг дізнати дійсну причину невдач.

Річ у тому, що початковий газоподібний гелій тоді було дуже важко отримати. Спочатку в лабораторії Камерлінг-Оннеса гелій здобували, подрібнюючи шматки гірської породи з Ісландії. Лише потім на кораблі привезли з Північної Кароліни гелій, що містить, пісок, і вдалося отримати чверть літра рідкого гелію. Природно, Камерлінг-Оннес, що називається, тремтів над гелієм. Особливо його турбувала можливість появи тріщин в скляному дьюаре. Щоб у разі появи тріщин гелій не випарувався в повітря, в кріостаті весь час підтримувався тиск, менший атмосферного. За наявності тріщин атмосферне повітря, потрапляючи в них, заморозилося б і тим самим залікувало їх.

Звичайно, весь час стояти, напружено вдивляючись в свідчення манометра, було досить важко. І ось одного разу, коли Полотно – співробітник Камерлінг-Оннеса – проводив вимірювання, хлопчик задрімав, і тиск в кріостаті почав поволі підніматися. Тому почала підніматися і температура рідкого гелію. Полотно, знаходячись в кімнаті, де розташовувалися дзеркальні гальванометри, раптом виявив, що зайчики гальванометрів почали відхилятися, реєструючи появу опору у ртуті. Так із-за неуважності помічника і було відкрито явище надпровідності. До цього слід додати, що якби Камерлінг-Оннес не зменшував тиск гелієвої пари, то надпровідність у ртуті не була б їм виявлена, оскільки температура надпровідного переходу у ртуті (4,15 К) трохи менше температури кипіння рідкого гелію за нормальних умов (4,2 К).

Те, що зменшення тиску пари гелію приводить до пониження температури, легко зрозуміти. Всі знають, що в горах, де тиск повітря менший, ніж на рівнинах, зварити круто яйця не можна, і зв'язано це з тим, що температура кипіння води знижується. Те ж саме відбувається і з рідким гелієм - з пониженням тиску його температура кипіння знижується.

4. Ідеальний провідник і надпровідник. Ефект Мейснера.

Для аналізу поведінки ідеального провідника в магнітному полі розглянемо контур, поміщений в поле з індукцією Ba (рис.4, а). Якщо площа, обмежена кільцем рівна А, то потік, що пронизує кільце, можна описати по формулі

.



При зміні прикладеного поля в кільці індукуються струми. Вони направлені так, що створений ними усередині кільця потік прагне компенсувати зміну потоку, викликану зміною прикладеного поля. Між індукційним струмом і електрорушійною силою (*-АdBа/dt*) справедливо наступне співвідношення:

*,*



де *R* і *L* - повний опір і індуктивність контура.

У звичайному кільці наведені струми із-за кінцевого опору швидко затухають і потік, пронизливий контур приймає нове значення. У разі ідеальної провідності R=0, останнє співвідношення приймає вигляд



або

*Li+ABa=const.*

Таким чином, повний магнітний потік через контур без опору (*Li+ABa*) не може змінитися. Навіть при зниженні зовнішнього поля до нуля, внутрішній потік зберігається завдяки циркулюючому в замкнутому кільці індукованого незгасаючого струму.

Все вищевикладене відносилося до умови, при якій кільце, знаходячись в прикладеному магнітному полі, охолоджувалося нижче за температуру *Тк*, при якій зникав опір. Якщо ж контур спочатку охолодити, а потім прикласти зовні поле, то результуючий внутрішній потік залишиться рівним нулю не дивлячись на наявність зовнішнього поля.

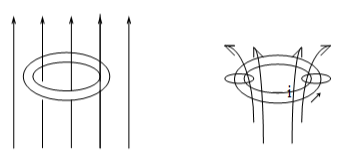


Рис. 4. а) б)

Розглянемо поведінку ідеального провідника в магнітному полі. Припустимо, що зразок з ідеального провідника проходить наступні стадії: спочатку охолоджується нижче за деяку температуру, коли падає опір, а потім накладається магнітне поле. Опір по будь-якому довільно вибраному замкнутому контуру усередині металу рівний нулю. Отже, величина магнітного потоку, ув'язненого усередині цього кільця, залишається рівною нулю. Довільність вибору контура дозволяє укласти, що магнітний потік рівний нулю за всім обсягом зразка. Це пов'язано з індукованими магнітним полем незгасаючими струмами по поверхні зразка. Вони створюють магнітний потік, щільність якого *Вi* всюди усередині металу точно рівна по величині і протилежна по щільності потоку прикладеного магнітного поля *Вa*. Таким чином, виникає ситуація, коли поверхневі струми, часто звані що екранують, перешкоджають проникненню в зразок магнітного потоку прикладеного поля. Якщо усередині речовини, що знаходиться в зовнішньому полі, магнітний потік рівний нулю, то говорять, що він проявляє ідеальний діамагнетизм. При зниженні щільності прикладеного поля до нуля зразок залишається в своєму ненамагніченому стані.

У іншому випадку, коли магнітне поле прикладене до зразка, що знаходиться вище за перехідну температуру, кінцева картина помітно зміниться. Для більшості металів ( окрім феромагнетиків ) значення відносної магнітної проникності близьке до одиниці. Тому щільність магнітного потоку усередині зразка практично рівна щільності потоку прикладеного поля. Зникнення електроопору після охолоджування не робить впливу на намагніченість, і розподіл магнітного потоку не міняється. Якщо тепер понизити прикладене поле до нуля, то щільність магнітного потоку усередині надпровідника не може мінятися, на поверхні зразка виникають незгасаючі струми, що підтримують усередині магнітний потік. В результаті зразок залишається весь час намагніченим. Таким чином, намагніченість ідеального провідника залежить від послідовності зміни зовнішніх умов.

У перебіг майже чверті століття вважали, що єдиною характеристичною властивістю надпровідного стану є відсутність електричного опору. Це означає, що надпровідник в магнітному полі поводитиметься так, як описано вищим. Проте такий підхід приводить до неоднозначного опису надпровідної фази.

Експеримент, що ілюструє перехід з надпровідного стану в звичайне продемонстрував, що надпровідники - щось більше, ніж ідеальні провідники. Вони володіють додатковою властивістю, відсутнім від металу, просто позбавленого опору: метал в надпровідному стані ніколи не дозволяє магнітному потоку проникнути всередину, завжди *Вi*=0.

Коли надпровідник охолоджується в слабкому магнітному полі, то при температурі переходу на його поверхні виникає незгасаючий струм, циркуляція якого перетворює внутрішній магнітний потік в нуль. Це явище, що полягає в тому, що усередині надпровідника щільність магнітного потоку завжди, навіть в зовнішньому магнітному полі, рівна нулю, називається *ефектом Мейснера*.

Ефект виштовхування магнітного поля з надпровідника можна пояснити на основі уявлень про намагніченість. Якщо екрануючі струми, повністю компенсуючи зовнішнє магнітне поле, повідомляють зразку магнітний момент *m*, то намагніченість *M* виражається співвідношенням

*,*



де *V* - об'єм зразка. Можна говорити про те, що екрануючі струми приводять до появи намагніченості, відповідної намагніченості ідеального феромагнетика з магнітною сприйнятливістю, рівною мінус одиниці.

5.Надпровідники першого та другого роду.

*Надпровідники першого роду.*

Проаналізуємо протікання струму по провіднику круглого поперечного перерізу, що знаходиться в надпровідному стані. У відмінності від екрануючого струму, що виникає при накладанні магнітного поля, струм від зовнішнього джерела називатимемо транспортним. Якби цей струм протікав усередині надпровідника, він створював би в його об'ємі магнітне поле, що протирічить ефекту Мейснера. Отже, струм, що протікає повинен бути обмежений тонким шаром біля поверхні, в який проникає магнітне поле. Товщина цього поверхневого шару рівна глибині проникнення Δ.

Транспортний струм, що протікає по надпровіднику, створюватиме магнітне поле. Між щільністю струму і магнітним полем існує строгий зв'язок, який означає, що критичному полю відповідає певна критична щільність струму (правило Сильсбі). Причому абсолютно байдуже, про який струм йде мова - транспортний, або що екранує. Для провідника з круглим поперечним перерізом магнітне поле на поверхні *В0* і сумарний струм *I* зв'язані відношенням

*,*



де *R* - радіус поперечного переріру провідника.

З даного рівняння виходить, що критичний струм має таку ж залежність від температури, як і критичне магнітне поле. Розрахунок показує, що, наприклад, для олов'яного дроту радіусом 0,5 мм критична сила струму при *Т=0* До складає 75 А *.*

За допомогою правила Сильсбі можна визначити також критичні струми для надпровідників в зовнішньому магнітному полі. Для цього необхідно скласти зовнішнє магнітне поле з полем транспортного струму на поверхні. Щільність струму досягає результуюче значення, коли це результуюче поле *Врез* стаєкритичним. Для дроту радіусом *R* в магнітному полі *Bа,* перпендикулярному її осі:

*.*



Тут значення *2Вa* на твірній циліндра отримано для коефіцієнта розмагнічування *uм=1/2.*

Залежність критичного струму від зовнішнього поля *Вa* можна визначити з рівняння:

*­­.*



Графік її представлений на рис.5.

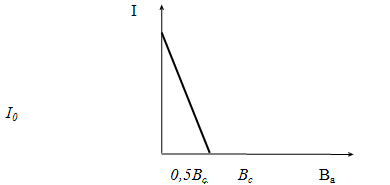


Рис. 5. Залежність критичного струму від зовнішнього магнітного поля, перпендикулярного дроту.

Процес порушення надпровідності в масивних зразках досягши критичної сили струму відбувається з утворенням проміжного стану. Структура його для циліндрового зразка представлена на рис.6. При включенні зовнішнього магнітного поля відбувається його накладення на кругове поле струму, внаслідок чого геометрія міжфазних меж між надпровідними і нормальними областями значно ускладнюється.

В кінці розмови про надпровідники першого роду відзначимо, що низькі критичні параметри роблять практично неможливим їх технічне використання.

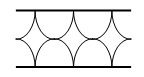


Рис. 6. Структура проміжного стану дроту, що несе критичний струм.

*Надпровідники другого роду*.

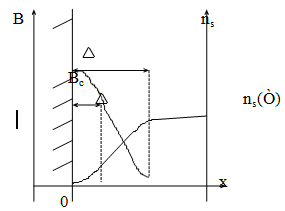
Принципова відмінність надпровідника другого роду від надпровідника першого роду починає виявлятися в той момент, коли магнітне поле на поверхні досягає значення *Вc1* . При цьому надпровідник переходить в змішаний стан. Проникнення магнітного поля в об'єм надпровідника приводить до того, що в цих умовах транспортний струм розподіляється рівномірно по всьому перетину, не зайнятому вихровими нитками. Таким чином, на відміну від надпровідників першого роду, в яких струм протікає по тонкому поверхневому шару, в надпровіднику другого роду транспортний струм протікає у всьому об'ємі.

Відомо, що між струмом і магнітним полем завжди існує сила взаємодії, яку називають силою Лоренса. Стосовно змішаного стану надпровідника ця сила діятиме між абрикосовскими вихорами і транспортним струмом. Можливості транспортного перерозподілу струму обмежені кінцевими розмірами провідника, і, отже, під дією сили Лоренса вихрові нитки повинні переміщатися. Для опису особливостей поведінки надпровідників в магнітному полі проаналізуємо термодинаміку утворення поверхонь розділу між надпровідною і нормальною фазами. У нормальній області *В∆Bc*, у надпровідній спадає до нуля на глибині порядку ∆ (рис.7). У нормальному стані щільність надпровідних електронів рівна нулю, в той час, як в надпровіднику вона має певну величину *ns(Т).* На деякій відстані від межі *∆* щільність надпровідних електронів по порядку величини досягає значення, рівного *ns(Т).* Характеристичний параметр *∆* називають довжиною когерентності, залежність її від температури визначається формулою

*,* де *∆*0 залежить від властивостей надпровідника і складає по порядку величини 10-6 - 10-8 м.



Рис. 7. Розподіл магнітного потоку і густини надпровідних електронів поблизу фазової межі.



6. Ефект Джозефсона.

Якщо два надпровідники з'єднати один з одним «слабким» контактом, наприклад якнайтоншою смужкою з діелектрика, через нього піде тунельний надпровідний струм, тобто відбудеться тунелювання надпровідних куперовских пар. Завдяки цьому обидві системи надпровідників зв'язано між собою. Зв'язок цей дуже слабкий, оскільки мала ймовірність тунелювання пар навіть через дуже тонкий шар ізолятора.

Наявність зв'язку приводить до того, що в наслідок процесу обміну парами стан обох систем змінюється в часі. При цьому інтенсивність і напрям обміну визначається різницею фаз хвилевих функцій між системами. Якщо різниця фаз ϕ = ϕ1 – ϕ2, тоді з квантової механіки слідує

.



Енергії в точках по одну і іншу сторону бар'єру *Е1* і *Е2* можуть відрізнятися тільки якщо між цими точками існує різниця потенціалів *Us*. В цьому випадку

. (1)



Якщо надпровідники зв'язані між собою з одного боку і розділені слабким контактом з іншою, то напруга на контакті можна викликати, міняючи магнітний потік усередині контура, що утворився. При цьому

.



Враховуючи, що квант потоку і потік *Ф* через контур може бути лише *nФ0*, де n=0,±1,±2,±3... Джозефсон передбачив, що

, (2)



де *Is* - струм через контакт, *Ic* - максимальний постійний джозефсонівский струм через контакт, ϕ - різниця фаз.

З (1), (2) слідує

.



Оскільки на фазове співвідношення між системами впливає магнітне поле, то надпровідним струмом контура можна управляти магнітним полем. В більшості випадків використовується не один джозефсонівский контакт, а контур з декількох контактів, включених паралельно, так званий надпровідний квантовий інтерферометр Джозефсона (НКВІД). Величина магнітного поля, необхідного для управління струмом, залежить від площі контура і може бути дуже мала. Тому НКВІДи застосовують там, де потрібна велика чутливість.

7. Високотемпературна надпровідність**.**

Розглянутий раніше механізм переходу в надпровідний стан заснований на міжелектронній взаємодії за допомогою кристалічної решітки. Як показують оцінки, для такого механізму надпровідності, звана фононним, максимальна величина критичної температури не може перевищувати 40 К.

Таким чином, для реалізації високотемпературної надпровідності (з *Тc>90 К*) необхідно шукати інший механізм кореляції електронів. Один з можливих підходів описаний підходів описаний американським фізиком Літтлом. Він припустив, що в органічних речовинах особливої будови можлива надпровідність при кімнатних температурах. Основна ідея полягала в тому, щоб отримати свого роду полімерну нитку з регулярно розташованими електронними фрагментами. Кореляція електронів, рухомих уздовж ланцюжка, здійснюється за рахунок поляризації цих фрагментів, а не кристалічної решітки. Оскільки маса електрона на декілька порядків менше маси будь-якого іона, поляризація електронних фрагментів може бути сильнішою, а критична температура вищою, ніж при фоновому механізмі.

У основі теоретичної моделі високотемпературної надпровідності, розробленої академіком В.Л.Гизбургом, лежить так званий механізм екзитонної взаємодії електронів. Річ у тому, що в електронній системі існують особливі хвилі - екситони. Подібно до фононів вони є квазічастинками, що переміщаються по кристалу і не пов'язаними з перенесенням електричного заряду і маси. Модельний зразок такого надпровідника є металевою плівкою в шарах діелектрика або напівпровідника. Електрони провідність, рухома в металі, відштовхує електрони діелектрика, тобто оточують себе хмарою надмірного позитивного заряду, який і приводить до утворення электронної пари. Такий механізм кореляції електронів передбачає вельми високі значення критичної температури (*Тc=200 К*).

8. Критичні стани.

#### 8.1. Критичні магнітні поля.

Критичне магнітне поле в надпровідниках, характерне значення напруженості магнітного поля *Нк ,* вище якого виникаеє повне або часткове проникнення магнітного поля в надпровідник. При *Н < Нк* магнітне поле в надпровідник не проникає, його екранує поверхневий надпровідниковий струм (*ефект Мейсера*).

В надпровідниках першого роду, до яких відноситься більшість чистих металів, речовина переходить в звичайнний, ненадпровідний стан при *Н > Нк* (*фазовий перехід першого роду*). Відповідаюче цьому переходу критичне магнітне поле *Нк* зв’язане з різницею вільної енергії нормальної *Fн* і надпровідної *Fнп* фаз співвідношенням:

В надпровідниках другого роду (зазвичай це сплави) проникнення магнітного поля починається з утворення вихрових ниток, в серцевині яких в основному зосереджене магнітне поле. При цьому речовина ще не втрачає надпровідних властивостей, і по ньому протікають струми, які часково екранують зовнішнє поле. Відповідне початку проникнення критичне магнітне поле Нк1 менше термодинамічного критичного поля Нк для цих речовин. Повне проникнення магнітного поля в надпровідник наступає при *Нк2* , яке може бути як менше, так і більше *Нк*. В так званих жорстких надпровідниках, серед яких найбільш відомі сплави на основі ніобія, критичне магнітне поле *Hk2 Hk1*. При значеннях поля *Hk2* і *Hk1*



8.2. Критичний струм.

У надпровідників 1-го роду критичний струм *Ic*, при якому надпровідність руйнується, співпадає із струмом, що створює на поверхні зразка магнітне поле *Н = Нс* (правило Сильсбі). Наприклад, для циліндрового зразка радіусу r магнітне поле на його бічній поверхні пов'язане з поточним струмом співвідношенням:

.



Для надпровідників другого роду правило Сильсбі непридатно. Критичний струм в надпровідниках 2-го роду незвичайно чутливий до структури зразка і у одного і того ж матеріалу може мінятися на декілька порядків величини.

8.3. Критична температура.

Розглянемо, в яких межах міняється *Тк* . У елементарних надпровідників, включаючи елементи, що виявляють надпровідність при високому тиску, мінімальне значення *Тк*має вольфрам: *Тк* = 0,015 К, максимальне - ніобій: *Тк* = 9,25 К. У сплавів *Тк* має істотно вищі значення: V3Ga - 14,5 K, V3Si - 17 K, Nb3Sn - 18 K, Nb3Al – 8 К, Ge0,2 - 20,7 K. Рекордне значення Тс до 1986 року мало з'єднання Nb3Ge - 23,2 K. У нещодавно синтезованих вуглецевих кластерів - фулеренов, легованих калієм, K3C60, *Тс* = 20 К. Прі легуванні фулеренов цезієм і рубідієм (CsC60 і PbC60) Тс підвищується до 30 К.

Цікаво відзначити, що до 1986 року існувало думка, що високотемпературна надпровідність (при температурах вище за температуру кипіння рідкого азоту) неможлива. Тому відкриття Беднорцем і Мюллером в 1986 році надпровідності у керамік La2 - xBaxCuО4 з *Тк* = 35 K і La2 - xSrxCuO4 з *Тк* = 40 K з'явилося справжньою сенсацією. Незабаром після цього відкриття були синтезовані кераміки YBa2Cu3O7 - x з *Тк* = 90 K, Bi2Sr2CaCu2O8 з *Тк* = 110 K, Tl2Ba2CaCu2O8 з *Тк* = 125 K. У найостанніший час синтезовано з'єднання HgBa2Ca2Cu3O8 + x з *Тк* = 135 К.

Безумовно, відкриття надпровідників з такими значеннями Тс є видатним досягненням, оскільки для охолоджування надпровідних систем стало можливим використовувати дешевий і відносно легко доступний рідкий азот замість дорогого гелію. Проте всі приведені значення Тс істотно нижчі за кімнатну температуру, і тому надзвичайно актуальна можливість синтезу нових надпровідників з ще вищими *Тк* . Пошуком високотемпературних надпровідників зайнято зараз багато лабораторій миру.

Після відкриття високотемпературної надпровідності і до теперішнього часу в літературі з'являються повідомлення про спостереження надпровідності при температурах вище 140 До і навіть при кімнатній температурі: близько 310 К (біля + 400 С). Правда, автори відзначають, що надпровідні фази, що володіють такими *Тк*, є термодинамічно нестійкими і розпадаються при багатократному пониженні і підвищенні температури. Що можна сказати із цього приводу? Мабуть, гранично високим значенням *Тк* = 135 К за нормальних умов володіє система HgBa2Ca2Cu3O8 + x . Це термодинамічно стійке значення. Дуже цікаво, що якщо це з'єднання піддати всесторонньому стисненню, то його *Тк* оборотно підвищується до значення близько 160 К ! Це указує на можливість синтезу надпровідників з такими *Тк*. Наскільки реально буде отримати термодинамічно стійкі надпровідники вищими *Тк*, сказати важко, хоча отримання метастабільних фаз з *Тк* = 300 К є, мабуть, можливим і представляє, на мій погляд, великий інтерес, оскільки свідчить про принципову можливість існування надпровідності при таких температурах.

9. Застосування надпровідності.

Питання різних застосувань надпровідності почали обговорюватися практично відразу ж після відкриття цього вражаючого явища. Ще Камерлінг-Оннес вважав, що за допомогою надпровідників можна економічним чином створювати сильні магнітні поля. Проте реальне використання надпровідності почалося лише в кінці 50-х-начале 60-х років. В даний час вже працюють надпровідні магніти практично будь-яких розмірів і будь-якої форми. Вони вийшли за рамки чистих наукових досліджень, і сьогодні їх широко використовують в лабораторній практиці, в прискорювальній техніці, медичних томографах, установках для керованої термоядерної реакції. За допомогою надпровідності стало можливим набагато підвищити чутливість багатьох видів вимірювань. Надпровідність стала не тільки технічною дисципліною, але і окремою галуззю промисловості. І, звичайно, відкриття високотемпературної надпровідності створило передумови до ширшого впровадження в повсякденну практику різних надпровідних пристроїв. Нижче ми приведемо для ілюстрації лише декілька прикладів.

Найбільше застосування надпровідники знайшли в даний час в області створення сильних магнітних полів. Сучасна промисловість проводить з надпровідників II роду різноманітні дроти і кабелі, використовувані для виготовлення обмоток магнітів. Переваги надпровідних магнітів достатньо очевидні. Не кажучи навіть про можливість отримання за допомогою надпровідників значно сильніших магнітних полів (зараз в чисто надпровідних системах досягнуті поля більше 20 Тл), ніж при використанні залізних магнітів, надпровідні магніти є і економічнішими. Так, наприклад, для підтримки в мідному соленоїді з внутрішнім діаметром 4 см і завдовжки 10 см поля в 10 Тл необхідна електрична потужність не менше 5100 кВт, яку потрібно повністю відвести водою, що охолоджує магніт. Це означає, що через магніт треба прокачувати не менше 1 м3 води в хвилину, а потім її ще охолоджувати в спеціальному пристрої (градирне). У надпровідному варіанті такий об'єм магнітного поля створюється досить просто, необхідне лише створення гелієвого криостата для охолоджування обмоток, що зараз є досить простій технічним завданням.

Дуже вигідно використовувати надпровідники в електротехніці і енергетиці. Адже в даний час втрати на тепло джоуля в проводах, що підводять, оцінюються величиною 30-40 %, тобто більш за третину всієї вироблюваної енергії витрачається дарма на «опалювання» Всесвіту. Якщо ж передавати електроенергію по надпровідних проводах з нульовим опором, то таких втрат не буде взагалі. Це все одно, що відразу більш ніж на третину збільшити вироблення електроенергії. На основі надпровідників можна створювати електродвигуни і генератори з високим ККД і іншими покращуваними робочими характеристиками. Піонером в області впровадження високотемпературних надпровідників в електромережу, що діє, стала Данія. З лютого 2001 року в Копенгагені в ділянку трифазної електромережі напругою 30 кВ встановлений надпровідний кабель завдовжки 30 м. В кінці цього ж року в детройті (США) увійшла до експлуатації ділянка електромережі завдовжки 120 м. В кінці 2001 року в Росії був успішно випробуваний досвідчений двигун з ВТНП потужністю 30 кВт.

Принадна перспектива використання ефекту механічного відштовхування надпровідника на транспорті. Мова йде про створенні поїзда на магнітній подушці, в якому будуть повністю відсутні втрати на тертя об колію дорогі. На початку 2003 року в Японії був випробуваний такий пасажирський поїзд. Склад з чотирьох вагонів «пролетів» по експериментальній трасі в префектурі Яманаси на північний захід від Токіо із швидкістю 502 км/год. Силою магнітного поля, що створюється високотемпературними надпровідниками, поїзд підвело на 10 см від землі і через дві хвилини опустило вже за 18,5 км. від стартового майданчика.

Табл .2. Сфери застосування надпровідності.

|  |  |
| --- | --- |
| Застосування | Примітки |
| Крупномасштабне  а) екранування | Надпровідник не пропускає магнітний потік, отже, він екранує електромагнітне випромінювання. Використовується в мікрохвильових пристроях, захист від випромінювання при ядерному вибуху. |
| Високоточні пристрої  а) магніти  б) науково-дослідне устаткування  в) магнітна левітація | НТСП магніти використовуються в прискорювачах частинок і установках термоядерного синтезу.  Інтенсивно проводяться роботи із створення поїздів на магнітній подушці. Прототип в Японії використовує НТСП. |
| Інші статичні застосування  а) передача энергії  б) акумуляція  в) обертальні електричні машини  г) обчислювальні пристрої | Прототипні лінії НТСП продемонстрували свою перспективність.  Можливість акумулювати електроенергію у вигляді циркулюючого струму  Комбінація напівпровідникових і надпровідних приладів відкриває нові можливості в конструюванні обладнання. |

10. Висновки.

Відкриття явища надпровідності Камерлінг-Оннесом в 1911 році зумовило до вивчення нового класу речовин – *надпровідників.* Вчені досліджували надпровіднісь довгий час, але причина явища була встановлена тільки в 1957 році Дж. Бардіном, Л. Купером і Дж. Роберт Шріффером. Вони пояснили це явище на основі квантової теорії.

Надпровідність не могла отримати практичне застосування в різних галузях техніки, так як для її отримання потрібна була надзвичайно низька температура. Так в 1964 році була відкрита високотемпетатурна надпровідність, яка дала можливість отримати надпровідний стан при температурі майже -100 ºС.

Високотемпературні надпровідникові матеріали радикально розширили можлиість практичного використання надпровідності для створення нової техніки та використання її в галузях народного господарства.

*11. Список використаних джерел.*

1. Кресин В.З. Сверхпроводимость и сверхтекучесть. – М.: Наука, 1978. – 190с.
2. Минеев В.П., Самохин К.В. Введение в теорию необычной сверхпроводимсти. – М.: МФТИ, 1998. – 144с.
3. Колашников С.Г. Курс загальної фізики. Том ІІ: Електрика. – К: Радянська школа, 1964. – 630с.
4. В.Л. Гинзбург. Сверхпроводимость: позавчера, вчера, сегодня, завтра // Успехи физических наук. – М., 2000. – С. 619 – 630.
5. Science Time [веб-ресурс] // Информационный научний журнал. (http://www.science-time.com/).
6. Wikipedia [веб-ресурс]. Електронна енциклопедія // Сверхпроводимость. (http://ru.wikipedia.org/wiki/Сверхпроводимость/).