

Prehod v superprevodno stanje

Uvod

Leta 1911 je nizozemski fizik H. Kammerlingh Onnes – specialist za eksperimentalno fiziko nizkih temperatur – pri poskusih s tekočim helijem ugotovil, da teče pri temperaturah pod 4.15 K električni tok v živem srebru brez upora. Pojav je poimenoval superprevodnost in za odkritje dve leti kasneje dobil Nobelovo nagrado. Kmalu zatem so odkrili še druge elemente, zlitine in spojine, ki pri dovolj nizki temperaturi preidejo v superprevodno stanje. Do leta 1986 je bila najvišja znana kritična temperatura 23.2 K pri spojini Nb₃Ge. Snovi, pri katerih pride do prehoda v superprevodno stanje blizu absolutne ničle, uvrščamo med t. i. *nizkotemperaturne superprevodnike*. Pri teh prehod v superprevodno stanje dobro pojasnjuje teorija Bardeena, Cooperja in Schriefferja (BCS), po kateri bi kritična temperatura lahko dosegla kvečjemu 30 ali 40 K.

Leta 1986 sta K. A. Müller in J. G. Bednorz odkrila superprevodnost tudi v spojini (La-Ba)₂CuO₄ s temperaturo prehoda 35 K: to je nakazovalo, da najverjetneje ne gre za običajen superprevodnik. Nekaj mesecev kasneje so odkrili materiale, katerih kritična temperatura presega od 77 K, kolikor znaša temperatura tekočega dušika, kar je s praktičnega stališča zelo pomembno. Danes največ uporabljamo YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) s kritično temperaturo okoli 100 K. Trenutno (2005) so najvišjo kritično temperaturo izmerili pri Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ba₂Ba₂Ca₂Cu₃O_{8.33} in sicer 138 K pri običajnem tlaku ter 164 K pri povišanem tlaku. Vsem omenjenim spojinam pravimo *visokotemperaturni superprevodniki*; fazni prehod in superprevodno stanje v teh snoveh teoretično slabše razumemo kot pri nizkotemperaturnih superprevodnikih.

Lastnosti superprevodnikov

Poleg tega neskončne električne prevodnosti imajo superprevodniki še vrsto drugih zanimivih lastnosti. Magnetno polje, ki je manjše od kritične vrednosti, prodira v superprevodnik le do vdorne globine λ , ki znaša navadno nekaj 10 nm, čemur pravimo Meissnerjev pojav. Kvalitativno ga opisuje Londonova enačba

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{\mathbf{B}}{\lambda^2}, \quad (1)$$

ki je izpeljana iz Maxwellovih enačb ob upoštevanju Meissnerjevega pojava. Iz zveze

$$\mu_0 \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B} \quad (2)$$

dobimo tudi

$$\nabla^2 \mathbf{j} = \frac{\mathbf{j}}{\lambda^2}. \quad (3)$$

V preprostih geometrijah zgornje enačbe ni težko rešiti. Iz rešitev hitro vidimo, da superprevodni tok teče le ob površini superprevodnika.

Glede na to, kako se vedejo v magnetnem polju, govorimo o superprevodnikih I. in superprevodnike II. vrste. Pri obeh Meissnerjev pojav izgine (magnetno polje začne prodirati v superprevodnik), če je magnetno polje večje od kritičnega polja B_c , ki je odvisno od temperature:

$$B_c = B_c(0) \left[1 - (T/T_c)^2 \right] \quad (4)$$

in je pri kritični temperaturi enako 0. Razlika med obema vrstama je v tem, da pri superprevodnikih I. vrste magnetno polje, katerega gostota je večja od B_c , v celoti poruši superprevodnost, po superprevodniku II. vrste pa nad prvim kritičnim poljem B_{c1} magnetno polje sicer prodre v superprevodnik, vendar tok še vedno teče brez upora. Del vzorca ostane superprevoden, del preide v normalno fazo v obliki vrtilinčnih niti, znotraj katerih magnetno polje ni enako 0. Superprevodnost poruši šele precej večje magnetno polje, ki ga imenujemo drugo kritično polje B_{c2} . Zato imajo superprevodniki II. vrste večjo uporabno vrednost.

Meissnerjev pojav lahko opazujemo v superprevodniku, okrog katerega je navita tuljeva, ki je priključena na galvanometer. Z drugo, večjo tuljavo spreminjamo zunanje magnetno polje. Dokler je to manjše od polja B_{c1} , se superprevodnik obnaša kot idealna diamagnetna snov z magnetno susceptibilnostjo -1 in galvanometer ne pokaže nobenega signala. Ko zunanje polje preseže kritično vrednost, začne magnetno polje prodirati v superprevodnik. Polje v tuljavici se ob vključitvi ali izključitvi zunanjega polja spremeni, kar vidimo na galvanometru.

Zanimivi so poskusi s superprevodnim obročem. Ob spremembi magnetnega pretoka skozi superprevodni obroč po slednjem steče tok: ta po Lenzovem pravilu

ustvari tako magnetno polje, ki nasprotuje spremembi. Ker inducirani tok teče po superprevodniku brez upora, se ne zaduši. To pomeni, da se magnetilni tok skozi obroč ohranja. Vsaka sprememba pretoka zunanjega magnetnega polja je uravnovešena s poljem inducirane toka.

Z merjenjem magnetnega polja ob superprevodnem obroču posredno merimo tok po obroču. Če bi superprevodnik imel končen upor, bi se tok in magnetno polje s časom zmanjšala. S spremljanjem magnetnega polja v daljšem časovnem obdobju so ocenili, da razpadni čas superprevodnega toka presega 100000 let.

Nizkotemperaturno superprevodnost razlaga teorija BCS, ki so jo leta 1957 predlagali J. Bardeen, L. N. Cooper in J. R. Schrieffer. Osnova te teorije je privlačna interakcija med elektroni, ki jo posredujejo fotoni, kakor tudi pravimo nihanju kristalne mreže. Elektron deformira kristalno mrežo, to deformacijo (presežek pozitivnega naboja) čuti drug elektron kot privlačno silo. Elektroni se povežejo v pare, ki jih imenujemo Cooperjevi pari. Elektrona v paru imata nasprotno enaki gibalni količini, tako da je gibalna količina Cooperjevega para enaka 0 – oziroma neki majhni vrednosti, če po superprevodniku teče tok. Pri sipanju delca (elektrona ali Cooperjevega para) na kristalni mreži lahko nastane foton. Delcu se v tem primeru gibalna količina zmanjša. Pri trku se ohranjata energija in gibalna količina. Označimo z m maso delca ter s \mathbf{p}' in \mathbf{p} gibalno količino delca pred trkom in po trku. Razliko gibalnih količin

$$\mathbf{p} - \mathbf{p}' = \mathbf{q} \quad (5)$$

odnese foton. Ohranja se tudi energija:

$$\frac{p^2}{2m} - \frac{p'^2}{2m} = c_z q. \quad (6)$$

S c_z smo označili zvočno hitrost. Ob upoštevanju pogoja, naj bo hitrost delcev enaka $v = p/m$, dobimo:

$$v \cos \theta = c_z + \frac{q}{2m}, \quad (7)$$

kjer je θ kot med \mathbf{p} in \mathbf{q} .

Če je hitrost delca v dovolj majhna, zadnje enačbe ni mogoče izpolniti. To pomeni, da se delci ne sipljejo na kristalni mreži in torej kristalna mreža ne nudi upora. Število prostih stanj s tako majhno gibalno količino je za fermione omejeno. Zato se le majhen delež vseh elektronov v snovi giblje brez upora. Cooperjevi pari pa se obnašajo kot bozoni in so lahko vsi istočasno v osnovnem energijskem stanju. V klasičnih nizkotemperaturnih superprevodnikih so nosilci superprevodnega toka Cooperjevi pari.

Preko privlačne interakcije, ki jo med elektronoma posreduje fonon, teorija BCS razloži zvezo med strukturo kristalne mreže in superprevodnostjo. Za kritično temperaturo da zvezo

$$k_B T_c = 1.14 \hbar \omega_D \exp(-1/N_F V), \quad (8)$$

ki se dobro ujema z meritvami (k_B je Boltzmannova konstanta, ω_D Debyeve frekvenca, N_F gostota stanj na enoto energije pri Fermijevi energiji in V privlačna interakcija med elektronoma preko kristalne mreže).

Drugače je pri visokotemperaturnih superprevodnikih; pri teh BCS teorija odpove. Visokotemperaturni materiali so običajno antiferoelektriki. Nosilci superprevodnega toka naj bi bile vrzeli, interakcijo med njimi pa verjetno posredujejo spini.

Meissnerjev pojav pri visokotemperaturnih superprevodnikih ni tako izrazit kot pri nizkotemperaturnih superprevodnikih, kajti tudi pri šibkih zunanjih magnetnih poljih visokotemperaturni superprevodniki le delno senčijo zunanje polje. Vsekakor pa imajo potencialno zelo veliko uporabno vrednost.

Uporaba superprevodnikov

Čeprav so iz superprevodnikov uspeli sestaviti različne elektronske elemente in detektorje, je zaradi nepraktičnosti hlajenja s helijem uporaba razširjena predvsem na dveh področjih.

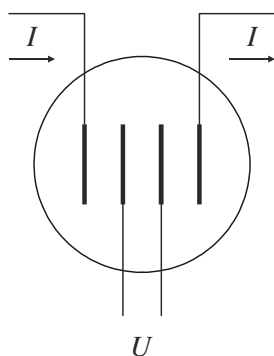
Superprevodni magneti se največ uporabljajo pri jedrski magnetni resonanci, pri slikanju z magnetno resonanco v zdravstvu in v pospeševalnikih. Zamenjali so klasične magnete, ki trošijo zelo veliko električno moč, če hočemo z njimi doseči

polja z gostotami nekaj T. Poleg tega je treba odvajati toploto, ki nastane zaradi Joulovih izgub v navitju magneta. Pri superprevodnih tuljavah teh težav ni.

SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) je izredno občutljiv detektor magnetnega polja. Sestavljen je iz superprevodnega obroča z enim ali z dvema šibkima spojem; šibek spoj je tanka izolacijska plast med dvema superprevodnikoma. Ob primernem vzbujanju z radiofrekvenčnim poljem ali z enosmernim tokom lahko SQUID zazna celo magnetna polja z gostoto 10 fT. Naprava se največ uporablja v biomagnetizmu za detekcijo magnetokardiograma (MKG) ali magnetoencefalograma (MEG).

Opis merskega sistema

Ker želimo imeti enostavno hlajenje s tekočim dušikom, bomo opazovali prehod v superprevodno stanje pri visokotemperaturnem superprevodniku iz družine keramik YBCO. Upor vzorca v odvisnosti od temperature bomo merili s štirikontaktno metodo (slika 1).



Slika 1: Stiki na tabletki YBCO za štirikontaktno meritev

Na tabletko vzorca YBCO premera 10.5 mm in debeline 2.5 mm so s srebrno pasto prilepljene 4 žičke. Štirje kontakti so potrebni zato, ker upor na stikih med žičkami in superprevodnikom ni zanemarljiv. Če bi merili napetost na stikih, kjer dovajamo tok, bi poleg upora vzorca YBCO merili še upor spojev.

Temperaturo superprevodnika merimo z baker-konstantanovim termočlenom. En spoj termočlena baker-konstantan je pritrjen na superprevodnik, drugi je potopljen v tekoči dušik.

Potek dela

Pri konstantni vrednosti toka 100 mA skozi superprevodnik izmerite napetost na superprevodniku v odvisnosti od temperature. Temperaturo spreminjate tako, da z dviganjem ali spuščanjem mizice, na kateri je dewarska posoda s tekočim dušikom, spreminjate lego gladine tekočega dušika glede na bakreni nosilec, v katerem je superprevodna tabletko.

Meritev začnite pri sobni temperaturi, torej preden postavite bakreni nosilec v dewarsko posodo. Potem postavite nosilec s tabletko v dewarsko posodo in počasi dvigajte mizico. Zapisujte si napetost na superprevodniku v odvisnosti od temperature. V bližini prehoda v superprevodno stanje merite bolj pogosto. Prehod pomerite vsaj še enkrat v nasprotni smeri, tako da vzorec segrevate iz superprevodnega v normalno stanje.

Narišite odvisnost upora vzorca v odvisnosti od temperature. Iz grafa določite temperaturo prehoda visokotemperaturnega superprevodnika YBCO v superprevodno stanje.

Literatura

- [1] A. W. B. Taylor, *Superconductivity* (Taylor & Francis, London, 1971).
- [2] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (John Wiley & Sons, New York, 1995).
- [3] M. Logar, *Superprevodnost. Možnosti za obravnavo pri pouku fizike*, magistrsko delo, Oddelek za fiziko, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Univerza v Ljubljani, 1993.
- [4] J. Strnad, Superprevodnost, *Obz. mat. fiz.* **40**, 110 (1993).