

Poglavje 18

Meritev magnetne susceptibilnosti supreprevodnika

18.1 Naloga

Izmeri odvisnost magnetne susceptibilnosti superprevodne keramike od temperature.

18.2 Uvod

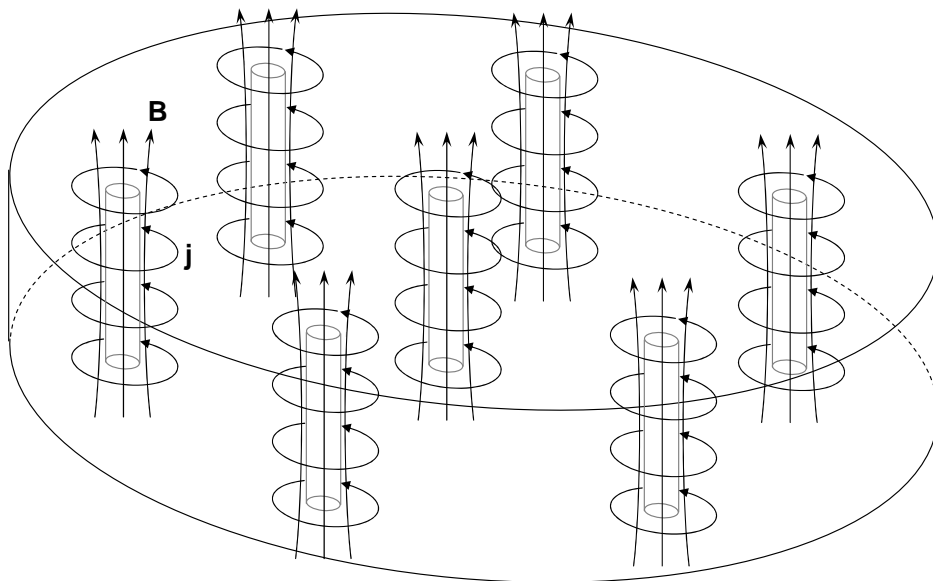
V snovi v zunanjem magnetnem polju se pojavi magnetizacija M (gostota magnetnega momenta). Če magnetno polje ni preveliko, velja linearna zveza

$$M = \chi H. \quad (18.1)$$

Sorazmernostna konstanta χ je magnetna susceptibilnost. Povezana je z magnetno permeabilnostjo $\mu = \chi + 1$. Kadar je susceptibilnost snovi negativna, $\chi < 0$, govorimo o diamagnetnih snoveh.

V izmeničnem magnetnem polju s frekvenco ω , $H(\omega) = H_0 \exp(i\omega t)$, magnetizacija vzorca, $M(\omega) = \chi(\omega)H(\omega)$, ni nujno v fazi z magnetim poljem. To opišemo s kompleksno susceptibilnostjo

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) + i\chi''(\omega), \quad (18.2)$$



Slika 18.1: V superprevodnike druge vrste prodira magnetno polje v obliki vrtilinčnih niti. Okoli magnetne niti se vrtilinec gostote električnega toka \mathbf{j} . Stržen niti je označen s svetlejšo barvo.

kjer imaginarni del $\chi''(\omega)$ predstavlja magnetne izgube.

Za superprevodnike je značilno, da niso samo idealni prevodniki ampak so tudi diamagnetiki, zato je gostota magnetnega polja v superprevodniku manjša kot v njegovi okolici. Izrivanje magnetnega polja iz superprevodnika imenujemo Meissnerjev pojav.

Superprevodniki prve vrste so skoraj idealni diamagnetiki. Njihova susceptibilnost je $\chi(\omega) \approx -1$ za dovolj nizke frekvence. Idealni diamagnetik se razlikuje od idealnega prevodnika po tem, da je v prvem $B = 0$, v drugem pa le $dB/dt = 0$ (Pokaži!).

Naš merjenec je superprevodna keramika $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, ki ima fazni prehod v superprevodno stanje blizu temperature 90 K. Visokotemperaturne superprevodne keramike so superprevodniki druge vrste. Le ti niso idealni diamagnetiki ($0 > \chi'(\omega) > -1$). Magnetno polje vanje vdira v obliki lokaliziranih vrtilinčnih niti. V strženu niti snov preide v normalno stanje. Magnetni pretok v vrtilinčni niti je kvantiziran,

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e_0}, \quad (18.3)$$

kjer sta e_0 osnovni naboj in h Planckova konstanta. Vrtinčne niti se lahko gibljejo, pri čemer nastajajo izgube. Pri dovolj nizkih temperaturah se vrtinčne niti navadno ujamejo na nečistoče in napake v kristalni strukturi in zato niso gibljive. Izgube so zato majhne. V bližini prehoda v normalno stanje pa niti niso več močno vezane in postanejo gibljive, zato se poveča imaginarni del susceptibilnosti $\chi''(\omega)$.

18.3 Opis vaje

Magnetno susceptibilnost snovi lahko merimo z merjenjem spremembe inducirane napetosti v tuljavi, v kateri je kos preiskovane snovi, v izmeničnem magnetnem polju.

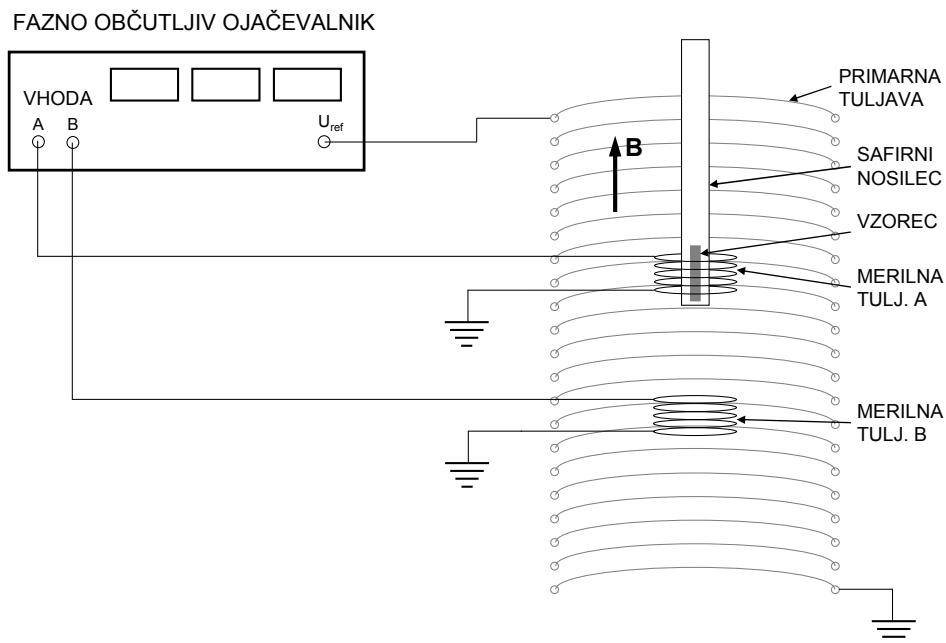
Susceptometer, ki temelji na tem principu je sestavljen iz treh tuljav. S tokom skozi večjo primarno tuljavo ustvarimo izmenično magnetno polje $B = B_0 e^{-i\omega_0 t}$. V primarni tuljavi sta dve merilni tuljavi, ki sta kolikor mogoče enaki. Vzorec namestimo v eno od tuljav in merimo razliko induciranih napetosti na merilnih tuljavah. Ta je

$$\Delta U = U_A - U_B = i\omega_0 \mu_0 C N S_v M = i\omega_0 C N S_v B \chi(\omega) \quad (18.4)$$

kjer je U_A inducirana napetost na tuljavi z vzorcem, U_B napetost na prazni referenčni tuljavi, N število ovojev merilnih tuljav, S_v pa ploščina preseka vzorca pravokotno na os tuljave. Numerična konstanta C je odvisna od oblike vzorca in je običajno ne poznamo dobro, zato lahko merimo zanesljivo predvsem relativne spremembe $\chi(\omega)$. Za vzorce, ki so dolgi v primeri z merilno tuljavo, je sicer $C \simeq 1$.

Merjena napetost je dokaj majhna in fazno zamaknjena glede na magnetno polje. Zato za detekcijo potrebujemo fazno občutljiv ojačevalnik (FOO), ki nam omogoča opazovanje signala v zelo ozkem frekvenčnem pasu, s čimer se znebimo večine šuma. Poleg tega omogoča tudi določanje faze.

Izmenično napetost z amplitudo U_0 iz referenčnega oscilatorja FOO s frekvenco ω_0 vodimo na primarno tuljavo in s tem dobimo izmenično magnetno polje. Inducirani napetosti na merilnih tuljavah vodimo na vhoda A in B FOO, ki razliko napetosti $U_{AB} = U_A - U_B$ zmnoži z referenčno napetostjo pri ω_0 . Zanima nas $U_{AB}(\omega_0)$; ostalo je šum. V produktu referenčne napetosti in signala dobimo istosmerno komponento $U_s = \frac{1}{2} U_0 U_{AB}(\omega_0) \cos(\delta)$, kjer je δ fazni zamik merjene napetosti glede na referenčno. Da se znebimo šuma, signal po množenju vodimo na nizkopasovni filter, katerega časovno konstanto



Slika 18.2: Shema meritve.

nastavimo na primerno vrednost. Če je premajhna, nas moti šum, če pa je velika, moramo na vsak izmerek dolgo čakati.

Naš FOO ima dva detekcijska kanala z dvema ločenima merilnikoma. V obeh sta referenčni napetosti enaki po velikosti, njuni fazi pa se razlikujeta za $\pi/2$. Na ta način nam en merilnik da del signala, ki je v fazi z referenčnim izhodom, drugi pa del, ki je za $\pi/2$ iz faze. Prikaz lahko izberemo tudi tako, da opazujemo absolutno vrednost signala in njegovo fazo. Nastavimo lahko tudi skupno fazo, za katero sta fazi obeh kanalov premaknjeni glede na fazo referenčnega oscilatorja.

Po enačbi (18.4) je zaradi faktorja i realni del χ' povezan s signalom, ki je za $\pi/2$ iz faze, χ'' pa s signalom, ki je v fazi s tokom skozi primarno tuljavo. Ker ima ta ohmsko upornost in induktivnost, je referenčni tok za neznano fazo premaknjen glede na napetost referenčnega izhoda.

18.4 Potek dela

Oglej si posebna navodila za uporabo susceptometra in FOO.

Vzorec superprevodne keramike je že pričvrščen na safirni nosilec, ki ga lahko premikamo po osi merilnih tuljav. Najprej postavi susceptometer v dewarsko posodo napolnjeno s tekočim dušikom. Vzorec se s tem ohladi na temperaturo blizu vrelišča tekočega dušika, to je okoli 80 K. Temperaturo meriš s termočlenom baker-konstantan, katerega referenčni spoj daš v manjšo dewarsko posodo napolnjeno z mešanico vode in ledu. Umeritvena tabela za termočlen je priložena vaji.

Kadar je nosilna palica potisnjena v susceptometer do objemke, je vzorec že nameščen v sredino merilne tuljave. Postavi nosilec 2-3 cm nad najnižji položaj. S tem sta obe merilni tuljavi prazni. Zveži kable s FOO: referenčno napetost na primarno tuljavo (priključek označen s P), sekundarni tuljavi A in B pa na ustrezna vhoda FOO.

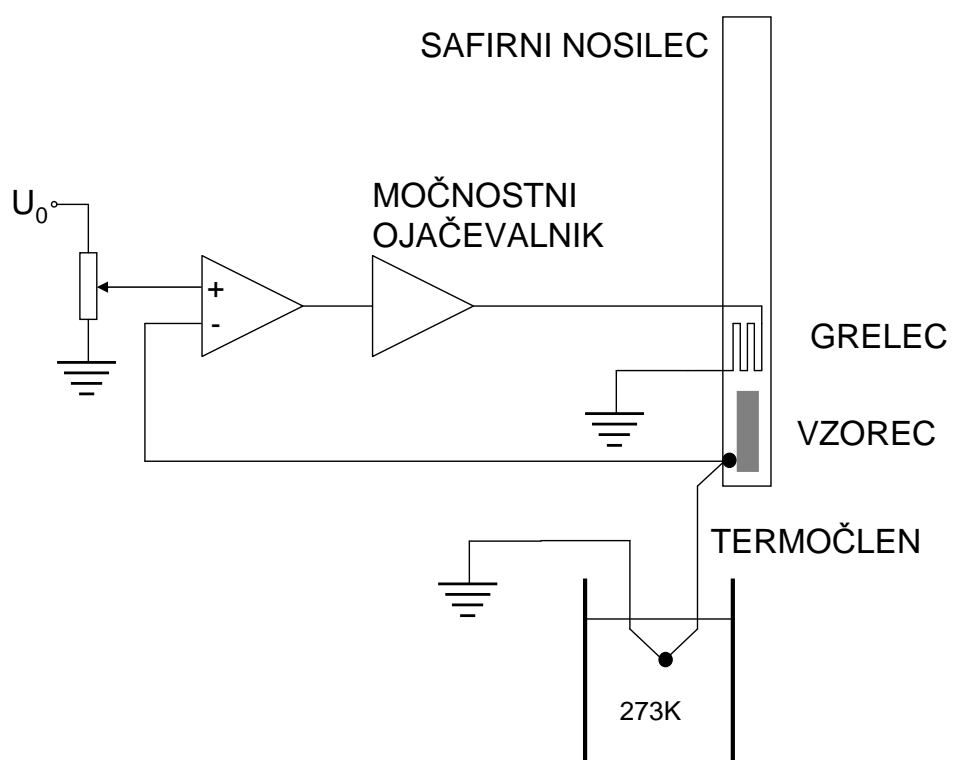
O delovanju FOO se pouči iz navodil za uporabo. Prikaz merilnikov postavi na merjenje dveh pravokotnih komponent X in Y. Izberi najprej merilno frekvenco. Začni pri okoli 200-300 Hz. Pazi, da izbrana frekvenca ne bo večkratnik omrežne frekvence. Preklopi FOO le na merjenje vhoda A. in izberi skupno fazo FOO tako, da bo signal na kanalu X največji. Na ta način si FOO nastavi tako, da je kanal X za $\pi/2$ fazno premaknjen glede na polje B primarne tuljave in bo komponenta X sorazmerna z realnim delom susceptibilnosti χ' , komponenta Y pa s χ'' .

Preklopi FOO na merjenje razlike napetosti vhodov A - B. Ker vzorec še ni v merilni tuljavi, je dobljeni signal posledica tega, da obe tuljavi nista povsem enaki. Povečaj občutljivost tako, da je signal blizu polne skale merilnika in nastavi offset kanalov X in Y tako, da bosta oba kazala 0. Nato potisni nosilec vzorca do objemke. S tem je vzorec v merilni tuljavi in merjeni signal je sorazmeren s χ' (kanal X) in χ'' (kanal Y). Po potrebi povečaj občutljivost in nastavi časovno konstanto FOO tako, da bo signal dovolj stabilen, to je na 1 - 3 s. V kolikor si spreminjal občutljivost moraš izvleči vzorec in ponovno nastaviti offset kanalov.

Temperaturo vzorca nastaviš s proporcionalnim regulatorjem, ki napaja grelec na safrinem nosilcu sorazmerno z razliko referenčne napetosti, ki jo nastaviš s potenciometrom, in napetosti termočlena, ki jo na regulator vodiš iz izhoda voltmetra.

Počasi dviguj temperaturo in meri obe komponenti signala. V okolici superprevodnega prehoda se susceptibilnost spreminja hitro, posebno imaginarni del, zato meri dovolj na gosto. Meri do kakih 20 K nad prehodom.

Meritev ponovi pri nekaj frekvencah med 50 in 1000 Hz. Pri tem moraš vsakič ponoviti postopek nastavljanja skupne faze in offseta merilnih kanalov.



Slika 18.3: Regulacija temperature

Nariši diagrame $\chi'(T)$ in $\chi''(T)$ pri različnih frekvencah in jih primerjaj.

18.5 Vprašanja

V principu bi lahko merili inducirano napetost in njene spremembe samo na tuljavi z vzorcem. Katere prednosti prinaša uporaba referenčne tuljave?

18.6 Literatura

1. M. Tinkham, *Introduction to superconductivity*, McGraw-Hill, New York 1996.