

Mérési jegyzőkönyv:

Meissner effektus

Rakya Péter

mérőtársak: Mezei Márk és Pósfai Márton

mérés időpontja: 2007. március 29.
leadás időpontja: 2007. április 12.

Mérésvezető:
Dankházi Zoltán

1. Elméleti bevezetés

A szupravezető anyagok két jellemző tulajdonsága a zérus elektromos ellenállás és a Meissner-effektus, azaz a mágneses tér kiszorulása az anyagból. Ez utóbbi jelenség könnyebben mérhető. A Meissner-effektus azzal magyarázható, hogy az anyag ideális diamágnessé válik, azaz $\kappa = -1$. A jelenséget először a London-testvérek írták le. Számolásaik alapja, hogy egy nulla ellenállású vezetőben az elektronokat csak az elektromos erőter gyorsítja:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e\mathbf{E}, \quad (1)$$

ahol m az elektron tömege és e a töltése. Ezt beírva a harmadik Maxwell-egyenletbe a következő összefüggést kapjuk:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\text{rot} \mathbf{j} + \frac{ne^2}{m} \mathbf{B} \right) = 0. \quad (2)$$

A fenti egyenletben bármilyen időben állandó eloszlás egy megoldást ad. Egy másik megoldást kapunk, ha megköveteljük, hogy a zárójelben lévő kifejezés értéke legyen azonosan nulla:

$$\text{rot} \mathbf{j} + \frac{ne^2}{m} \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

A negyedik Maxwell-egyenlet felhasználásával differenciálegyenletet kapunk \mathbf{B} -re és \mathbf{j} -re:

$$\Delta \mathbf{B} = \frac{ne^2 \mu_0}{m} \mathbf{B} \quad \Delta \mathbf{j} = \frac{ne^2 \mu_0}{m} \mathbf{j} \quad (4)$$

A fenti egyenletek megoldásai egyszerű határfeltételek mellett:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \exp\left(-\frac{x}{\Lambda}\right) \quad \mathbf{j} = \mathbf{j}_0 \exp\left(-\frac{x}{\Lambda}\right) \quad (5)$$

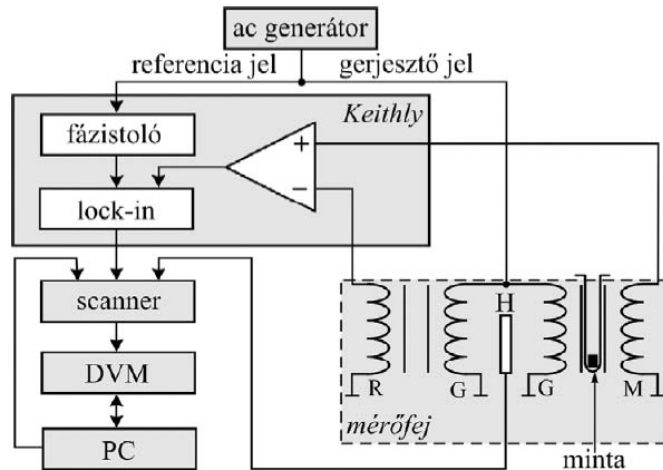
A képletek alapján szupravezetőkben az áram és a mágneses indukció csak egy vékony

$$\Lambda = \sqrt{\frac{m}{ne^2 \mu_0}}$$

vastagságú felületi rétegben van jelen. Az így számolt Λ behatolási mélység értéke jó összhangban van a kísérletileg meghatározott értékekkel.

2. A mérőműszer

Mivel a Meissner effektus kimutatása sokkal egyszerűbb, mint az ellenállás mérése, a mi célunk is szupravezető anyag mágneses tulajdonságainak mérése volt. A mérőberendezés sematikus vázolata az 1. ábrán látható. A mintát (amely kis üvegcsőben van), a tekercspárok egyikébe helyezük, a másik tekercspárt pedig üresen hagyjuk. (Az üresen hagyott tekercspárral a hőtágulásból adódó hibákat tudjuk kiküszöbölni.) A szekunder tekercsek feszültségének különbségét (mely a szuszceptibilitással arányos) differenciálerősítővel erősítjük. Ezt a jelet a lockin detektorba vezetjük, amellyel kis amplitúdójú váltóáramú jeleket lehet detektálni. Ez a berendezés egy



1. ábra. A mérőberendezés sematikus vázlatja.

adott referenciajel frekvenciájával megegyező jelet választ ki a zajos környezetből. A primer tekercsek gerjesztéséhez és a lockin referenciajelenek biztosításához egyetlen szinuszos kimenetű függvénygenerátort használunk, melynek frekvenciája a mérés során ~ 2 kHz volt. Egy számítógép AD konverterére a tekercsek között elhelyezett platina ellenálláshőmérő és a lockin detektor jele egy relés multiplexeren keresztül jut. Az adatokat a számítógép egy adatfájlba írja be.

A méréshez kiadott jegyzet szerint a feszültségek és a szuszceptibilitás között az alábbi összefüggés érvényes:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \kappa \frac{V_m}{V}, \quad (6)$$

ahol $V = 300 \text{ mm}^3$ a mintátm tartalmazó primer tekercs térfogata, $V_m = 22 \text{ mm}^3 \pm 1\%$ a minta térfogata, ΔU a szekunder tekercsek feszültségkülönbsége, U_0 az üres tekercspár szekunder tekercsének a feszültsége, κ pedig a keresett szuszceptibilitás.

3. A mérés menete

A lockin beállítása

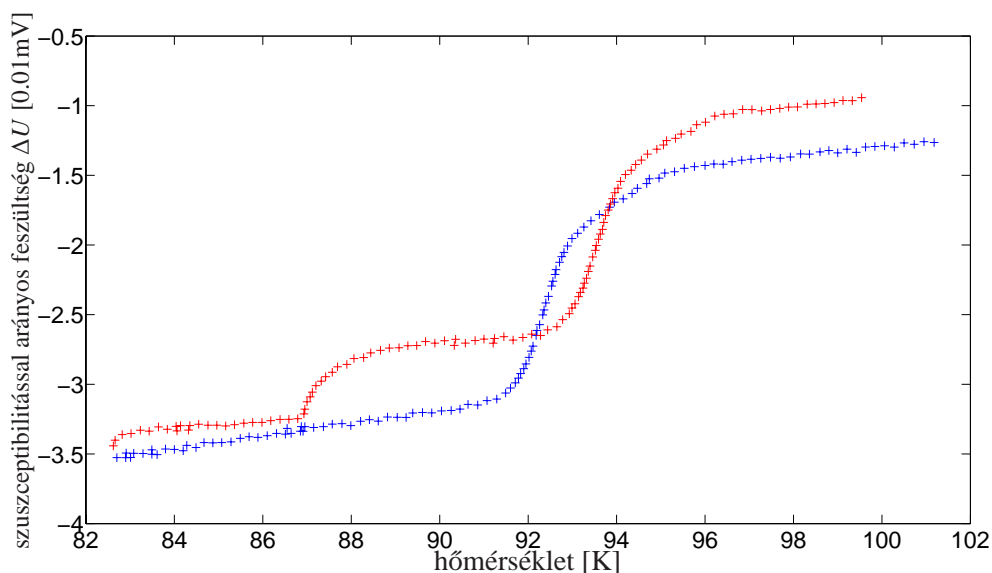
A műszerek jelterjedés sorrendű bekapcsolása után az első feladat a lockin helyes fázisszögének megválasztása. Mivel a két tekercs közötti eltérés szobahőmérsékleten rendkívül kicsi, a beállításhoz csak az egyik tekercs jelét használtuk. A maximumhely megtalálását nehezíti, hogy ott a kimenő jel lassan változik a fázisszög függvényében. Pontosabb eredményt érünk el a nulla kimenőjelnek megfelelő fázisszöget megkeresve, amiből 90^0 -os fázistolással kapjuk meg a maximum pontos helyét. A differenciálerősítő bemenetét átállítva 180^0 -os fázisugrást érhetünk el. Ezt alkalmazva adott méréshatár mellett onnan ismerjük meg a nulla kimenetet, hogy a kijelzett érték nem változik meg. (Az offset értéket mérjük csak.) Egyre finomabb méréshatárral a maximum helye nagyon pontosan meghatározható, azonban az irányítópanel meghibásodása miatt épp abban a tartományban nem tudtunk dolgozni, ahol ez a nullátmenet megtalálható lenne. Így csak közelítőleg ($\sim 15^0$ -os pontossággal) tudtuk beállítani a megfelelő fázisszöget.

Vas, réz és alumínium minták mérése

Mielőtt elkezdtük volna a tényleges mérést, a mérőfejet vas, réz, alumínium és üres mintákon teszteltük. Az üres mintatartó behelyezése nem okozott mérhető effektust. Vas minta mérésekor a várható nagy ferromágneses kilengést tapasztaltuk. Réz és alumínium esetében egyaránt diamágneses viselkedést tapasztaltunk, ami meglepő hiszen az alumínium paramágneses anyag. Ennek a magyarázata a mérés módszerében rejlik: változó mágneses teret használunk, így ezekben a jó vezetőkben örvényáramok keletkeznek, melyek Lenz törvénye miatt effektív diamágneses jellegű mutatnak. A mérőfel tesztelése egyúttal arra is lehetőséget nyújtott, hogy meghatározzuk a mérőfej „polaritását”, azaz hogy a szupravezető anyag szuszceptibilitását előjelhelyesen határozzuk meg.

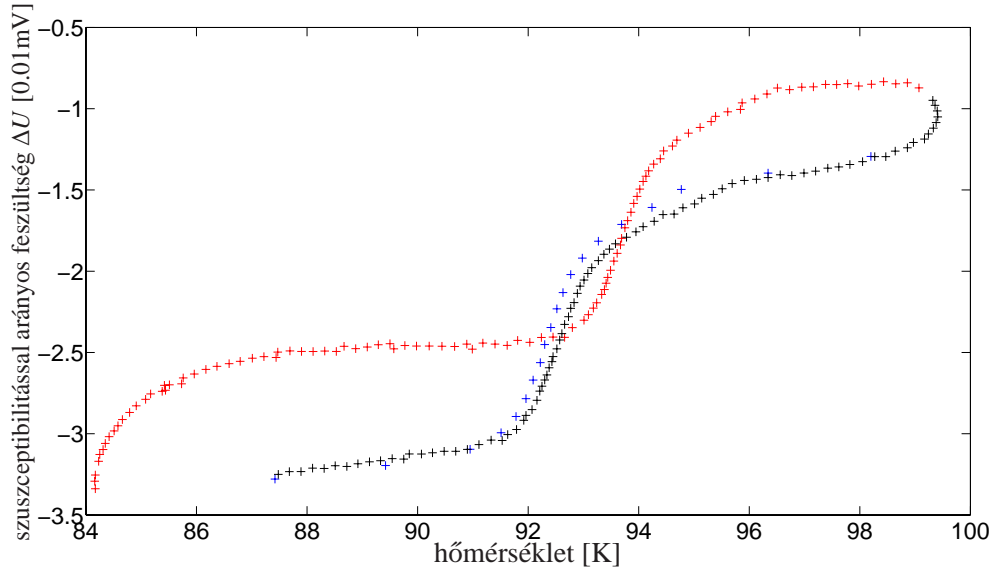
A mérés

A mintát ($YCu_3Ba_2O_7$) behelyeztük az egyik tekercspár belsejébe, folyékony nitrogént öntöttünk egy termoszba, majd a mérőfejet is behelyeztük. A mintát nem engedték a folyadékban elmerülni, néhány cm-rel fölötté rögzítettük. Így a mintát a nitrogéngőz hűtötte, ezzel is szabályozva a minta gyors hűlését. (Így lehettünk biztosak abban, hogy a hőmérő valóban a minta hőmérsékletét mutatta.) A mérőfej lényegében teflonból készült, egybeépítve tartalmazta a két tekercspárt és a platinaellenállás-hőmérőt. A fázisátalakulás után a mérőfejet feljebb húztuk, így lassan elkezdett melegedni, és a számítógéppel a melegedési görbét is rögzítettük. A mérés nem mondható sikeresnek, hiszen a frissen forrasztott kontaktusok termikus hatásai (termofeszültség, stb.) lényegesen módosították azt a grafikont amit vártunk. A kapott grafikonok a 2. és 3. ábrákon láthatóak. Hogy kiértékelhető adataink legyenek, kaptunk egy régebben lemerített adatsort.

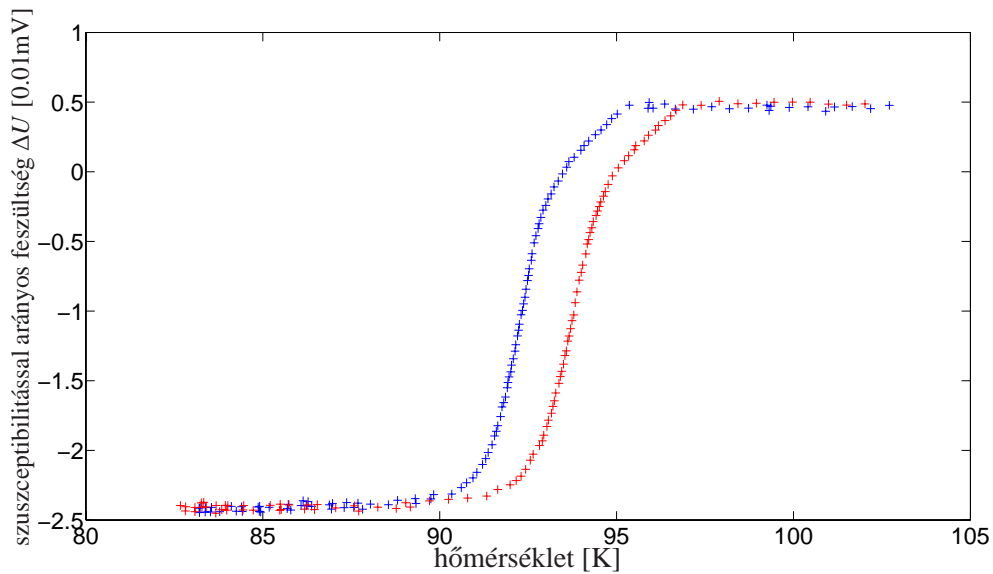


2. ábra. A mért grafikon.

Ennek a grafikonja a 4. ábrán látható. A két görbe nem fedte egymást, hiszen a teflon nem ideális hővezető, ezért mindig van hőmérsékletkülönbség a minta és a hőmérő között. Ebből természetesen adódik a grafikonok hiszterézises jellege. A két görbét a gyorsan változó szakaszok



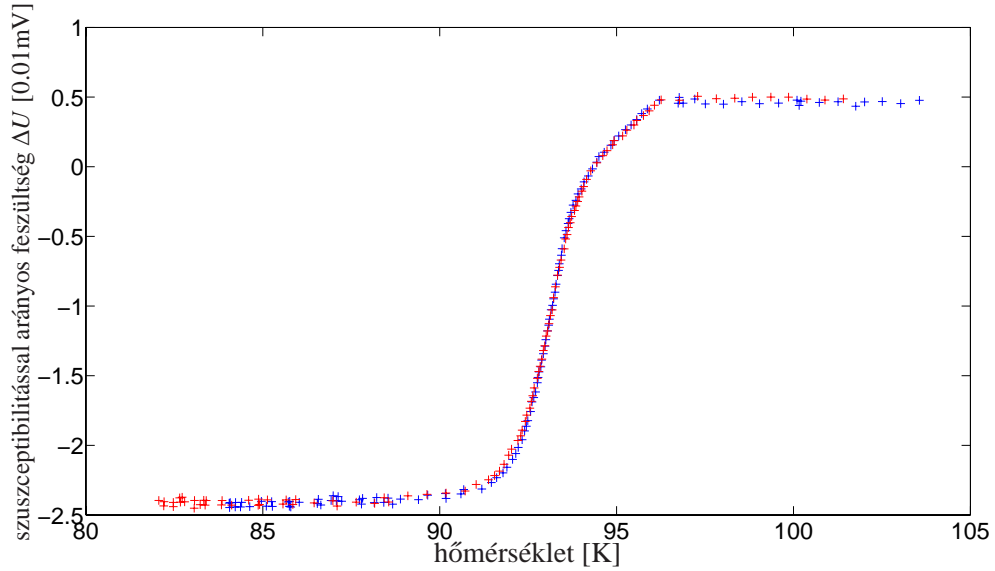
3. ábra. A mért grafikon. Az ábrán két hűlési szakasz látható.



4. ábra. A kapott adatsor grafikonja.

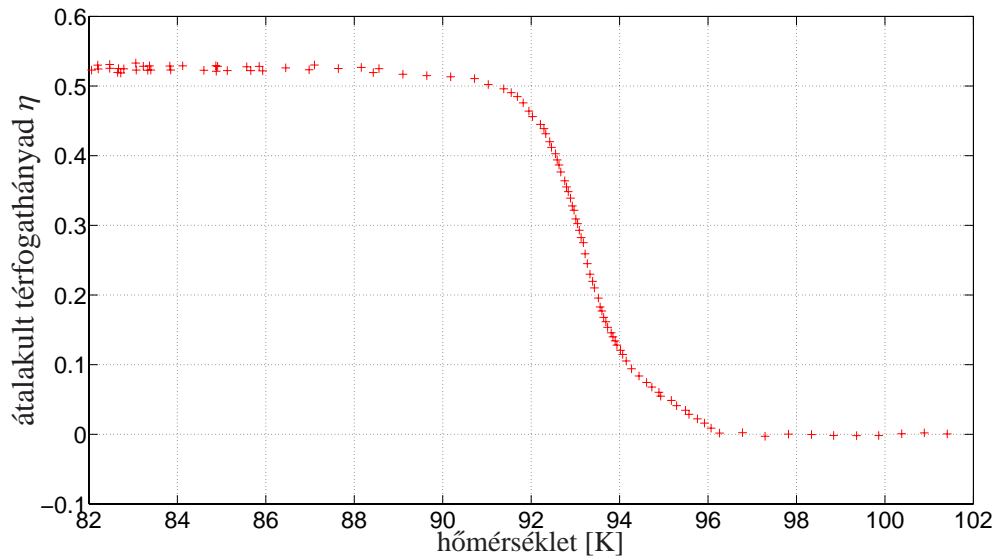
sebességeinek arányában toljuk egymásra. (A hűlési sebesség $(0.16 \pm 0.01) \mu\text{V}/\text{K}$, a melegedési pedig $(0.18 \pm 0.01) \mu\text{V}/\text{K}$ -nak adódott a leggyorsabban változó szakaszon.) Az egymáshoz igazított görbéket az 5. ábra szemlélteti. A tökéletes szupravezető szuszceptibilitása -1 kell legyen, a (6) egyenletből azonban nem ez adódik. A magyarázat abban rejlik, hogy a minta nem alakult át teljesen szupravezetővé. Mivel a normál fázis szuszceptibilitása elhanyagolhatóan kicsi 1-hez képest, ezért a képletből tulajdonképpen az számolható ki, hogy a minta mekkora része alakult át a hőmérséklet függvényében. Az átalakult térfogatarány tehát a (6) egyenlet segítségével:

$$\eta = \frac{\Delta U}{\kappa U_0} \frac{V}{V_m} \quad (7)$$



5. ábra. Az egymásratolt görbék.

A fázisátalakulást szemléltető grafikon felső platójának a műszerek pontos beállítása mellett 0-nak kell lennie. Az eltolás az offset feszültség miatt van. A grafikonról leolvastva $U_{offset} = (4.9 \pm 0.1)10^{-3}$ mV-nak adódik. Ezzel az értékkel kell a grafikont lecsúsztatni. A képletben szereplő U_0 feszültség pedig az üres tekercspár szekunder tekercsének a feszültsége. Ezt úgy határoztuk meg, hogy lemértük mindkét üres tekercspár feszültségét, és az értékek abszolút értékű átlagát képeztük. Az átlagképzéssel ugyanis kiküszöböltük az általunk beállított offset feszültséget.



6. ábra. Az átalakult minta térfogathányada.

$$U_1 = (0.776 \pm 0.003) \text{ mV}$$
$$U_2 = (-0.729 \pm 0.003) \text{ mV}$$
$$U_0 = (0.752 \pm 0.006) \text{ mV}$$

Ekkor a (7) képlet segítségével felvehetjük az átalakult minta hányadát a hőmérséklet függvényében. A grafikont a 6. ábra szemlélteti. Maximálisan a minta $(52 \pm 3)\%$ -a alakult át szupravezető fázisúvá. Az átalakulás hőmérsékletére $T = (93.2 \pm 0.2) \text{ K}$ adódik, felhasználva hogy ez az a hőmérséklet, ahol a szuszceptibilitás a maximális érték felét veszi fel. Az átalakulás szélességét úgy definiáljuk, mint annak a két hőmérsékletértéknek a különbsége, ahol a szuszceptibilitás eléri a maximális érték 10%-át ill. 90%-át. Így az átalakulás szélessége: $(4.5 \pm 0.4) \text{ K}$.