

# Mag- és Szilárdtestfizikai Laboratórium

## 6. Meissner-effektus mérése

Barta Dániel

A mérés dátuma: <b>2009.04.30. csütörtök</b>	Laborvezető neve: <b>Dankházi Zoltán</b>	Értékelés:
A beadás dátuma: <b>2009.05.25. hétfő</b>	A mérést végezte: <b>Barta Dániel - Lovász Béla - Rátkai László</b>	

# 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. Számolásai 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:

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

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:

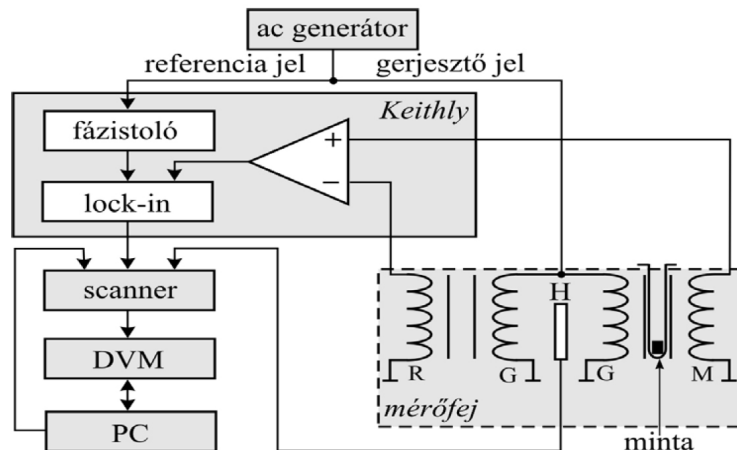
$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{-x/\Lambda} \quad \mathbf{j} = \mathbf{j}_0 e^{-x/\Lambda}, \quad (5)$$

ahol  $\Lambda = \sqrt{\frac{ne^2\mu_0}{m}}$  az a szupravezetőkre jellemző vékony felületi réteg, amelybe az áram és a mágneses indukció még behatol. Az így számolt  $\Lambda$  behatolási mélység értéke jó összhangban van a kísérletileg meghatározott értékekkel.

## 2. Mérőberendezés és beállítása

### 2.1. A berendezés adatai

Mivel a Meissner effektus kimutatása sokkal egyszerűbb, mint az ellenállás mérése, a mi célunk is szupravezető anyag mágneses tulajdonságainak mérése volt. A mérőberendezés vázlata az 1. ábrán látható. A kis üvegcsőben elhelyezett mintát a tekercspárok egyikébe helyezzük, a másik tekercspárt pedig üresen hagyjuk. Az üresen hagyott tekercspárral a hőágulásból adódó hibákat tudjuk kiküszöbölni. A szekunder tekercsek feszültségének különbségét – mely a szuszeptibilitással arányos – differenciálerősítővel erősítjük. Ezt a jelet a lockin detektorba vezetjük, amellyel kis amplitúdójú váltóáramú jeleket lehet detektálni. Ez a berendezés egy adott referenciajel frekvenciájával megegyező jelet választ ki a zajos környezetből. A primer tekercsek gerjesztéséhez és a lockin referenciajelének biztosításához egyetlen szinuszos kimenetű függvénygenerátort használunk, melynek frekvenciája a mérés során  $\sim 2$  kHz volt. Egy számítógép AD konverterére a tekercsek között elhelyezett platina ellenálláshomérő és a lockin detektor jele egy relés multiplexeren keresztül jut. Az adatokat a számítógép egy adatfájlba írja be.



1. ábra. A mérőműszer vázlata.

A méréshez kiadott jegyzet szerint a feszültségek és a szuszeptibilitás között az alábbi össze- függés érvényes:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \kappa \frac{V_{\text{minta}}}{V_{\text{tekeres}}}, \quad (6)$$

ahol  $V_{\text{tekeres}} = 300 \text{ mm}^3$  a mintát tartalmazó primer tekercs térfogata,  $V_{\text{minta}} = 22 \text{ mm}^3$  a minta térfogata,  $\Delta U$  a szekunder tekercsek feszültségkülönbsége,  $U_0$  az üres tekercspár szekunder tekercsének a feszültsége,  $\kappa$  pedig a keresett szuszeptibilitás.

## 2.2. Kalibráció

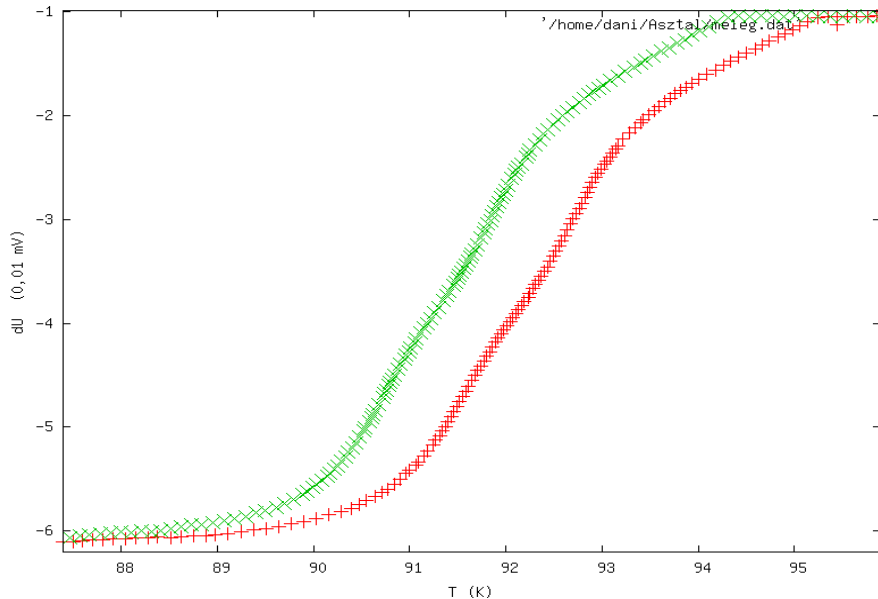
A feszültségmérő kalibrációjához a két bemenetet (+ és -) rövidre zártuk és az az üres tekercspár  $U_0$  feszültségét minimálisra állítottuk be. A - irányban 4,47 mV-ot, míg a + irányban 4,40 mV-ot mértünk. A feszültségmérő érzékenysége 10 mV-os volt, az erősítés pedig 1000x. Ekkor a maximumhelynél 65°-os fázistolás lépett fel.

## 3. Vas, réz, alumínium és üres minta vizsgálata

A mérőfejet először vas, réz, alumínium és üres mintákkal teszteltük. Az üres mintatartó behelyezése nem okozott mérhető változást. A vas minta mérésekor nagy ferromágneses kilengést tapasztaltunk. Réz és alumínium esetében egyaránt diamágneses viselkedést tapasztaltunk, ami első gondolatra kissé meglepő, hiszen az alumínium paramágneses anyag. A magyarázat a mérés módszerében rejlik: változó mágneses teret használunk, ami a jó vezetőkben olyan örvényáramokat kelt, melyek Lenz törvénye értelmében olyan mágneses teret keltenek, mely kioltani igyekszik az őket létrehozó teret. Így a minták effektíve diamágneses jelleget mutatnak. A mérőfej tesztelése egyúttal arra is lehetőséget nyújtott, hogy meghatározzuk annak polaritását, azaz hogy a szupravezető anyag szuszeptibilitását előjelhelyesen határozzuk meg.

## 4. A szupravezető lehűtése a kritikus hőmérséklet alá, majd felmelegítése

A mintát behelyeztük az egyik tekercs belsejébe, folyékony nitrogént öntöttünk egy nagyméretű termoszba, majd a mérőfejet is behelyeztük. A mintát nem engedték a folyadékban elmerülni, valamennyivel fölötté rögzítettük. Így a mintát a nitrogéngőz hűtötte, ezzel is szabályozva a minta hűlésének sebességét. Továbbá így lehettünk biztosak abban, hogy a hőmérő valóban a minta hőmérsékletéhez közeli értéket mutat, ugyanis ha gyorsabban hűtöttük volna a mintát, akkor nagyobb lett volna a hőmérséklet-gradiens is. A fázisátalakulás után a mérőfejet feljebb húztuk, így lassan elkezdett melegedni, és a számítógéppel a melegedési görbét is rögzítettük.

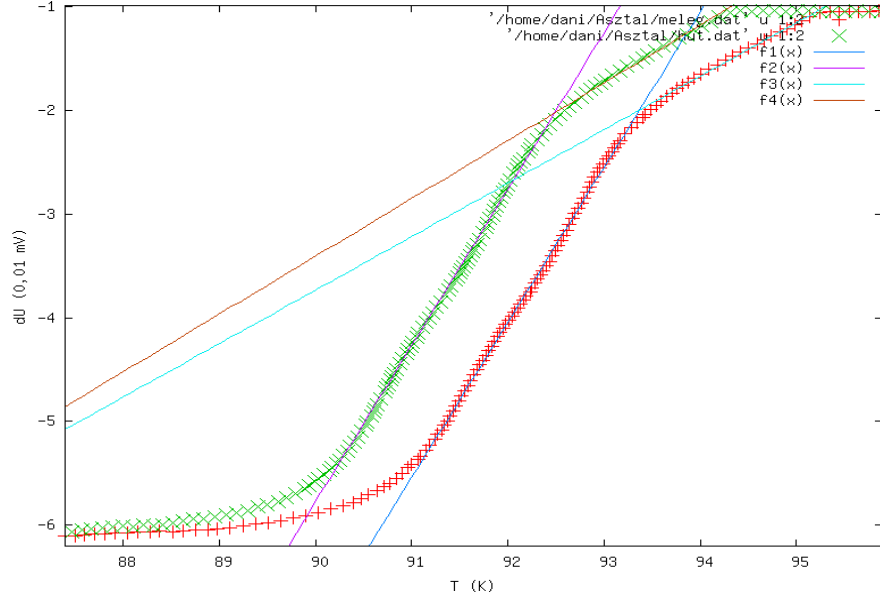


2. ábra. A hiszterézisgörbe a melegítést (piros) és a hűtést (zöld) során.

## 5. Az átalakulás hőmérsékletének és szélességének a meghatározása

A mérési adatok láthatóan hiszterézist mutatnak, ez a rossz hővezetés miatt van. A valódi görbe meghatározásának legegyszerűbb módja, ha a két görbét egybe toljuk, mind hőmérséklet, mind szerint azonos mértékben. Ahhoz, hogy meghatározzuk

a „mozgatások” mértékeit, kiválasztottunk mindkét adatsorból kettő-kettő egyenes szakaszt, melyek metszéspontjainak távolságát határoztuk meg. A mérési pontok és az egyenesek a 3. ábrán láthatók.



2. ábra. A görbékre illesztett egyenesek és metszéspontok.

Az illesztett egyenesek alakja a következő:

$$f_n(T) = a_n T + b_n, \quad i = 1..4, \quad (7)$$

ahol az egyes egyenesek illesztett paramétereit és azok pontosságát az 1. táblázatban láthatjuk.

n	$a_n$	$\delta a_n$	$b_n$	$\delta b_n$
1	$1,49519 \pm 0,007885$	0,53%	$-141,601 \pm 0,7264$	0,51%
2	$1,50671 \pm 0,008446$	0,56%	$-141,377 \pm 0,7706$	0,55%
3	$0,515545 \pm 0,007262$	1,41%	$-50,1321 \pm 0,685$	1,37%
4	$0,556776 \pm 0,008837$	1,59%	$-53,5165 \pm 0,8244$	1,54%

1. táblázat. Az illesztés paramétereit és azok pontossága.

Ezek alapján a metszéspontok koordinátái:<sup>1</sup>

$$\begin{aligned} f_1(T_1) = f_3(T_1) &\implies T_1 = \frac{b_3 - b_1}{a_1 - a_3} = \frac{91,4689 \pm 1,4114}{0,9796 \pm 0,0107} = 93,3737 \pm 2,4607 \text{ K} \\ f_2(T_2) = f_4(T_2) &\implies T_2 = \frac{b_4 - b_2}{a_2 - a_4} = \frac{87,8605 \pm 1,1285}{0,9499 \pm 0,0122} = 92,4944 \pm 1,9149 \text{ K} \end{aligned} \quad (8)$$

Felhasználva, hogy a kalibráció során kiderült hőmérséklet-feszültség összefüggést:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= f_1(T_1) = (-1,9896 \pm 1,4626) \cdot 0,01 \text{ mV} = -0,0199 \text{ mV} \\ \Delta U_2 &= f_2(T_2) = (-2,0147 \pm 2,1146) \cdot 0,01 \text{ mV} = -0,0201 \text{ mV} \end{aligned} \quad (9)$$

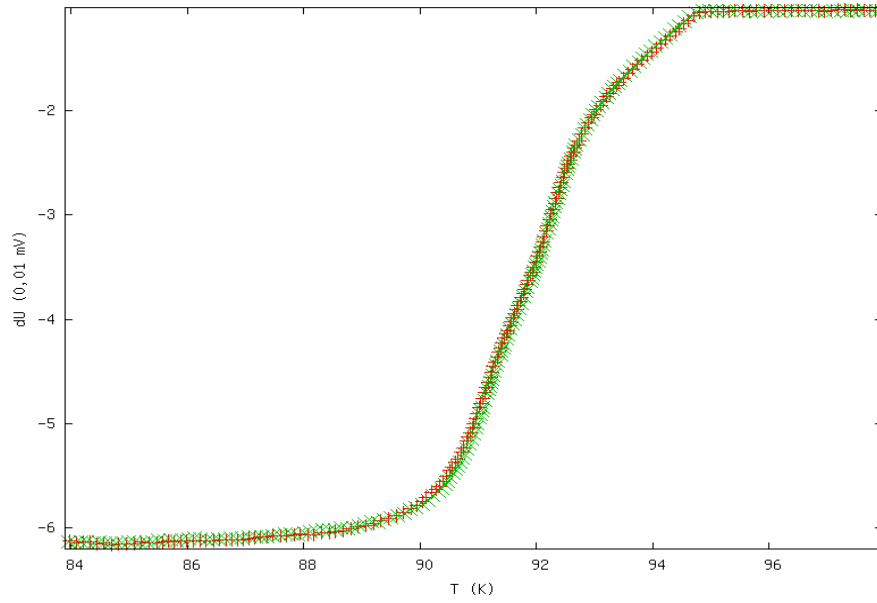
Ezekből az egyes görbék eltolásának mértéke:

$$\Delta T_{12} = \pm \frac{T_1 - T_2}{2} = \pm 0,4397 \text{ K}, \quad \Delta U_{12} = \pm \frac{U_1 - U_2}{2} = \pm 0,0001 \text{ mV} \quad (10)$$

A megfelelő adatokból kivonva, illetve hozzáadva a megfelelő eltolási értékeket kapjuk az egybetolt görbéket, amiket a 3. ábrán tüntettünk fel. Ha úgy definiáljuk az átalakulás hőmérsékletét, hogy ott van, ahol az anyag fele már átalakult, a másik fele még nem, akkor ennek értéke:  $T_C = 92,02 \text{ K}$ .

Ha úgy definiáljuk az átalakulás szélességét, mint annak a két hőmérsékletnek a különbségét, ahol a szuszeptibilitás érték a maximális érték 10% illetve 90%-át veszi fel, akkor ennek az értéke:  $\Delta T = 2,54 \text{ K}$ .

<sup>1</sup>Itt felhasználjuk a hibák kiszámítása során a [2]-ben található hibák összegére vonatkozó  $\Delta y = \frac{|\Delta y_1| + |\Delta y_2| + \dots + |\Delta y_n|}{n}$ , illetve a  $z = f(u, v) = u/v$  esetén a  $\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta u}{u} + \frac{\Delta v}{v}$  hányadosra összefüggéseket.



3. ábra. A  $-0,4397$  K-nel eltolt fűtési (piros) és a  $+0,4397$  K-nel eltolt hűtési (zöld) adatsor.

## 6. A szupravezető mennyiségének meghatározása

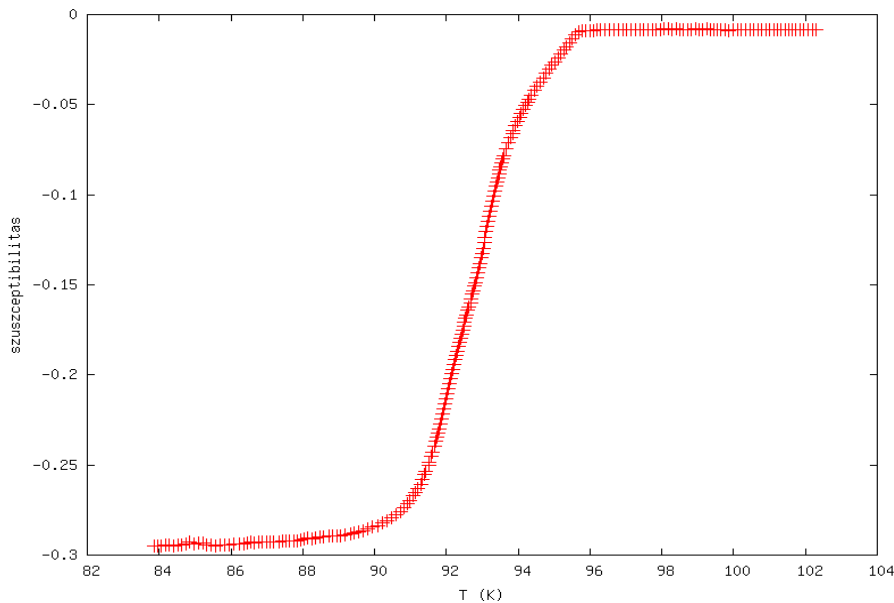
A bevezetőben leírtak alapján, valamint az adatainknak megfelelő előjelválasztással a szuszceptibilitás:

$$\chi = \frac{V_{\text{tekeres}}}{V_{\text{minta}}} \frac{\Delta U}{U_0}, \quad (11)$$

amikor is a minta és a tekercs térfogatának ismeretében  $U_0$ -t úgy határoztuk meg, hogy lemértük mindkét üres tekercspár feszültségét, és képeztük abszolút értékük átlagát:

$$U_0 = 2,5 \text{ mV}. \quad (12)$$

Ahhoz, hogy a szuszceptibilitást megkapjuk, kicsit el kell még tolnunk lefelé az összes mérőpontot, mivel a berendezésnek van egy offset feszültsége. Az eltolást úgy kell elvégezni, hogy a legfelső pontoknak a  $\Delta U = 0$  mV értéknél kell lenniük, ugyanis tudjuk, hogy az átalakulási hőmérséklet felett még közel zérusnak vehető a minta szuszceptibilitása. A szuszceptibilitás változása az alábbi ábrán látható:



4. ábra. A szuszceptibilitás hőmérsékletfüggése.

## 7. Irodalomjegyzék

[1.] Dankházi Zoltán: A Meissner-effektus vizsgálata - mérés leírás,  
<http://szft.elte.hu/oktat/szlab/meresleirasok/Meissner-j04.pdf>.

[2.] Mérések a klasszikus fizika laboratóriumban - hibaszámítás, *Havancsák Károly szerk.*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2003.

.....  
Barta Dániel