Jegyzőkönyv

4.
Termoelektromos hűtőelemek vizsgálata

Készítette:
Bozsoki Péter,
másodéves fizikushallgató

1999. április 16., péntek

1. A mérés célja

A klasszikus fizika két nagy területe, a termodinamika és az elektrodinamika "között" helyezkednek el a termoelektromos jelenségek. Közülük az öt legfontosabb: hővezetés (Fourier-effektus), Joule-hő, Thomson-, Seebeck- valamint a Peltier effektus. A mérés célja ezen jelenségek kísérleti megismerése volt.

2. A mérés elve

Legelőször röviden felidézem tartom az előző pontban felsorolt termoelektromos jelenségek lényegét. Sorrendben:

- a Fourier-effektus során a hőmérséklet-gradiens hatására hőáram indul meg, mely egyenesen arányos a hőmérséklet-gradienssel ($\boldsymbol{j}_T = -\lambda \mathrm{grad}T$, $\boldsymbol{j}_T$ a hőáramsűrűség, λ az arányossági együttható);
- a Joule-hő a vezetőben az elektromos áram hatására létrejött hő ($w_j=\rho \boldsymbol{j}^2$, ahol w_j az egységnyi térfogatban termelődő hő, $\boldsymbol{j}$ az elektromos áramsűrűség ρ pedig az arányossági tényező, az elektromos fajlagos ellenállás);
- a Peltier-effektusnál I áram hatására két különböző anyagú vezető érintkezési pontja lehűl vagy felmelegszik, az áram irányától függően ($Q=P_{ab}I$, ahol Q a termelődött/elnyelődött hő mennyisége, P_{ab} pedig a vezetők Peltier együtthatója);
- a Seebeck-effektus lényege, hogy a vezetőbeli hőgradiens hatására létrejön egy V_T termofeszültség ($S_{ab}(T_m) = \left.\frac{\partial V_{ab}}{\partial T_m}\right|_{T_h=áll}$, ahol ez az összefüggés adott anyagpárra, T_h=áll hidegponti hőmérséklet esetén igaz; a S_{ab} Seebeck együttható független a T_h hidegponti hőmérséklettől);
- Thomson-effektus miatt az inhomogén hőmérséklet-eloszlású vezetőben a rajta átfolyó áram hatására hő fejlődik ($w_\tau=\tau \boldsymbol{j}\cdot\mathrm{grad}T$, ahol w_τ az egységnyi térfogatban fejlődött hő, τ a Thomson együttható)

Az itt felsorolt arányossági tényezők között elméleti megfontolásból (is) megállapíthatóak összefüggések, ezeket most (mivel nem ezen jegyzőkönyv feladata) nem részletezem, csak a mérés során felhasznált összefüggéseket írom le: $S_{ab}=S_a-S_b$ és $P_{ab}=P_a-P_b$ minden anyagpárra, illetve $P(T)=T\cdot S(T)$, $S(T)=\int_0^T \frac{\tau(T')}{T'}dT'$.

A fentieket és a Thomson hő elhanyagolását (ebben a mérési elrendezésben S_{ab}=áll) figyelembe véve a hőegyenlet a következő alakot ölti: $Q = Q_{Peltier} - 0{,}5\cdot Q_{Joule} - Q_{hővezetés} - q = P_{ab}I - 0{,}5\cdot R_{ab}I^2 - \Lambda_{ab}(T_0-T) - q$, ahol q a környezettel történt hőcserét jelenti, R_{ab} a vezetők ohmikus ellenállását, Λ_{ab} pedig a $\Lambda_{ab} = \Lambda_a + \Lambda_b = (\lambda_a A_a + \lambda_b A_b)\cdot l$ összefüggéssel definiált hővezetést (l: vezetők hossza, $A_{a,b}$: a keresztmetszetük). Egyensúly esetén $Q=0 \Rightarrow T(I)=\frac{2\Lambda_{ab}^{-1}R_{ab}I^2+T(0)}{S_{ab}\Lambda_{ab}^{-1}I+1}$. Ha $z=\Lambda_{ab}^{-1}R_{ab}^{-1}S_{ab}^2 \Rightarrow \mathrm{I_{min}} = (\sqrt{1+2zT(0)}-1)\frac{\Lambda_{ab}}{S_{ab}}$ és $\mathrm{T_{min}} = (\sqrt{1+2zT(0)}-1)\frac{1}{z}$. z a $[2\,T_{\min}^{-2}\cdot(T(0)-T_{min})]$ kifejezéssel egyenlő.

A Seebeck együttható méréséhez szükséges tudnom a Peltier elem sarkain eső feszültséget. Ez: $U=IR_{ab} + S_{ab}(T_0-T)$ ($\Rightarrow U_{min} = S_{ab}T_0$).

3. A mérés kivitelezése

A méréshez egy stoppert használtam, mint időmérő eszközt (Δt=0,02 s), platinahőmérőt a hőmérséklet mérésére (ΔT=0,1 K) és egy áramgenerátort, mely által szolgáltatott áramot pontosnak tekintem.

Kihasználva, hogy azonos hőmérséklet esetén a Peltier elem sarkai közt nulla a feszültség, megmértem az elem vízhűtött sarkának hőmérsékletét. Háromszor végrehajtva a mérést a következő eredményeket kaptam: T_1=11,8±0,1 °C, T_2=11,7±0,1 °C, T_3=11,6±0,1 °C. A továbbiakban $\boldsymbol{T_{hidegpont}}$**=11,7±0,1 °C**-tal számolok.

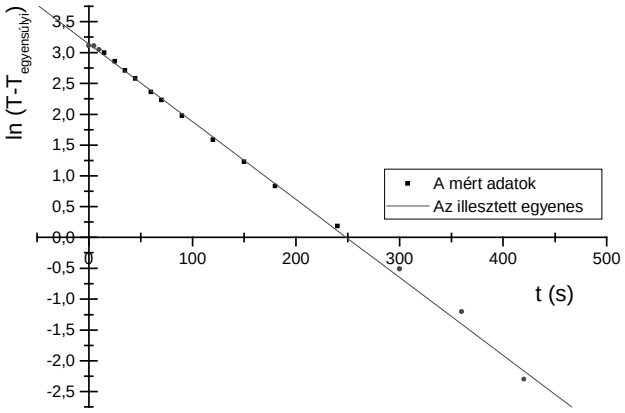
3.1. Karakterisztikus idő mérése

Az egyensúlyi hőmérséklet mérésnél tudnunk kell, hogy a rendszer mennyi idő múlva tekinthető egyensúlyban lévőnek. Mivel $T(t) = T_{egyensúlyi} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$ (ahol $T_{egyensúlyi}$ az egyensúlyi hőmérséklet, A a hőmérsékletváltozás, τ pedig a karakterisztikus idő) megmértem a T(t) görbét, majd az ln(T-$T_{egyensúlyi}$)-t a t függvényében ábrázolva meghatároztam a τ-t. Az 1-es táblázat tartalmazza a mért adatokat, I = 2,5 A -es áramerősség esetén. Az 1-es ábrán az illesztett egyenes látható. ($T_{egyensúlyi}$≈260 K, és az egyenest úgy illesztettem, hogy az utolsó és első három adatot nem vettem figyelembe, mert nem biztos, hogy tökéletesen határoztam meg $T_{egyensúlyi}$ -t, és az elején nem ideális az exponenciális sem).

Táblázat 1

t (s)	T (°C)	T (K)	Ln(T-$T_{egyensúlyi}$)
0	10	283,16	3,113515
5	9,8	282,96	3,104587
10	8,6	281,76	3,049273
15	7,5	280,66	2,995732
25	5	278,16	2,862201
35	2,5	275,66	2,70805
45	0,7	273,86	2,580217
60	-1,9	271,26	2,360854
70	-3,2	269,96	2,230014
90	-5,3	267,86	1,974081
120	-7,6	265,56	1,589235
150	-9,1	264,06	1,223775
180	-10,2	262,96	0,832909
240	-11,3	261,86	0,182322
300	-11,9	261,26	-0,51083
360	-12,2	260,96	-1,20397
420	-12,4	260,76	-2,30259
480	-12,5	260,66	

Ábra 1



A fenti adatokból az illesztett egyenes meredeksége $m = -\tau^{-1}$ = -0,0122±0,0001-nek lett, ln(A) értéke pedig 3,10-val egyenlő ⇒ **<u>τ=81,9±0,6 s</u>.** Azaz az egyensúly beálltához 3τ≈4 percet kell várni.

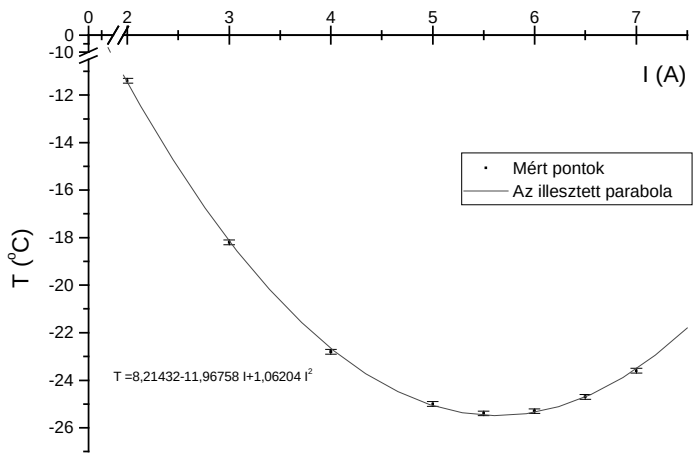
3.2. Maximális hőmérsékletkülönbség meghatározása

A maximális hőmérsékletkülönbség mérési adatait a 2-es táblázat tartalmazza. A 2-es ábrán a mért pontokat ábrázoló grafikon és a rájuk illesztett parabola látható.

Táblázat 2

I (A)	T_{egy} (°C)
2	-11,4
3	-18,2
4	-22,8
5	-25
5,5	-25,4
6	-25,3
6,5	-24,7
7	-23,6

Ábra 2



A táblázatban nem tüntettem fel a hőmérséklet-mérés hibáját: azt minden alkalommal 0,1°C-nak tekintettem.

Mint az ábrán is látható a parabola egyenlete T = 8,2-11,96·I+1,06·I^2. Az együtthatók illesztési hibái:

- a=8,2±0,3
- b=-11,96±0,15
- c=1,06±0,01

A görbe egyenletéből meghatározva annak minimumhelyét **I_{min}=5,63±0,1 A**-nek számoltam. A hiba mértéket a δb≈0,0125 és δc≈0,0094 relatív illesztési hibák összegeként számoltam (δI_{min}≈0,02), ugyanis a differenciálás után ezen két érték hányadosát kellett képeznem a minimum helyének meghatározásához (mivel a hőmérsékletnek itt van minimuma, ezért a hőmérsékletkülönbség itt maximális). Innen T_{min} értéke: **T_{min}=-25,5±0,1 °C**.

$$T_{\min} = \frac{R_{AB} \cdot I_{\min}}{S_{AB}} \Rightarrow S_{AB} = \frac{R_{AB} \cdot I_{\min}}{T_{\min}} = \frac{U(táp)_{\min}}{T_{\min}} = 1{,}11 \cdot 10^{-2} \frac{V}{K}$$, ugyanis $U_{táp}$=2,75±0,05 V

$$\delta U = \frac{0{,}03V}{2{,}75V} = 1{,}11 \cdot 10^{-2} \quad és \quad \delta T = \frac{0{,}1K}{247{,}5K} = 4{,}04 \cdot 10^{-4} \Rightarrow \delta S_{AB} = \delta U + \delta T \approx 0{,}012$$, tehát

$$\underline{\underline{(S_{AB})_1 = (1{,}11 \pm 0{,}02) \cdot 10^{-2} \frac{V}{K}}}$$

A Kelvin relációból: $\Pi_{AB} = T_{\min} \cdot S_{AB}$ =U(*táp*)=**2,75±0,05 V=Π_{AB}**

A jósági tényezőt ezen adatokból a $T_{\min} = \frac{1}{z}\left(\sqrt{1 + 2zT(0)} - 1\right)$ összefüggés segítségével tudom kiszámolni. $z = \frac{2}{T_{\min}^2}\left(T(0) - T_{\min}\right)$=**(1,19±0,02)·$10^{-3}$ K^{-1} = z**

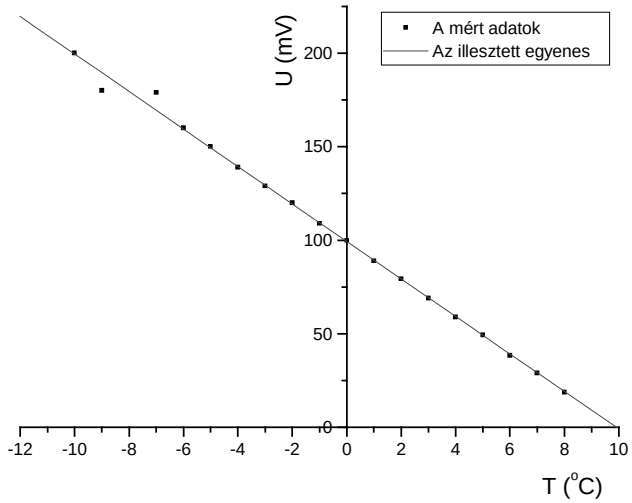
3.3. A Seebeck együttható közvetlen mérése

A visszamelegedés közben mért hőmérséklet-feszültség párokat a 3-as táblázat tartalmazza. A mért adatok grafikonja és az illesztett egyenes a 3-as ábrán láthatóak.

Táblázat 3

ΔU (mV)	T(°C)
200	-10
180	-9
179	-7
160	-6
150	-5
139	-4
129	-3
120	-2
109	-1
100	0
89	1
79,4	2
69	3
59	4
49,4	5
38,5	6
29,05	7
18,8	8

Ábra 3



Az illesztett egyenes meredeksége megegyezik a Seebeck együtthatóval: **$(S_{AB})_2$=10,01±0,15 mV·K^{-1}**. A kétféle módon származtatott Seebeck együtthatók hibahatáron belül megegyeznek.

Most már minden adatot ismerünk a Peltier elem ellenállásának meghatározásához, így a következő egyenletből meg tudjuk határozni: **R_{AB}**= $(U_{min}$- $S_{ab}(T_0$-$T))\cdot I^{1}_{min}$=(2,75 V -1,11·10^{-2} V/K·36,5 K)·0,1776 A^{-1}=**0,416±0,015 Ω**

Az elem hővezetése: $\Lambda_{AB} = \frac{I_{\min} S_{AB}}{\sqrt{1+2zT(0)}-1} = \frac{5{,}63A \cdot 1{,}11 \cdot 10^{-2}\frac{V}{K}}{\sqrt{1+2\cdot 1{,}19\cdot 10^{-3}K^{-1}\cdot 284{,}7K}-1} =$

0,21±0,02 WK^{-1}

3.4. teljesítményegyenlet diszkutálása

A $0 = P_p - 2^{-1}P_j - P_v - P_p$ teljesítményegyenletet a legnagyobb hatásfok, azaz a legnagyobb hűtés esetén vizsgálom. Ahol:

- P_p a Peltier-effektusból származó teljesítmény
- P_j a Joule-hő idő szerinti deriváltja
- P_v a hőtartályból elvezetett teljesítmény
- P_q a rendszerbe szökött hő.

Kifejtve $0 = T_{\min} S_{AB} I_{\min} - \frac{1}{4} R_{AB} I_{\min}^2 - \Lambda_{AB}\left(T_0 - T_{\min}\right) - P_q$.

$P_p = T_{\min} S_{AB} I_{\min}$ **=15,5±0,6 W (δP$_p$≈4 %)**

$\frac{1}{2} P_j = \frac{1}{4} R_{AB} I_{\min}^2$ **=3,3±0,23 W (δP$_j$≈7 %)**

$P_v = \Lambda_{AB}\left(T_0 - T_{\min}\right)$ **=7,8±0,7 W (δP$_v$≈10 %)**

⇒ P$_q$ = 4,4±0,4 W (δP$_q$≈10%)

A számolt értékek 10 % körüli hibái nagy részben köszönhető annak, hogy ezek már sokadik, a mért adatokból számolt értékek, így a hibák, a folyamatos felső becsléseknek köszönhetően "felhalmozódtak".

3.5. A parabolás közelítésnek helyességének bizonyítása

Az egyensúlyi függvényt a következőképp átrendezve, látható, hogy ha az (x,y) → ($\frac{T(0)-T(I)}{I^2}$, $\frac{T(I)}{I}$) koordinátarendszerben ábrázolom a mért pontokat (természetesen a megfelelő transzformáció után), akkor egy egyenest kell kapjak.

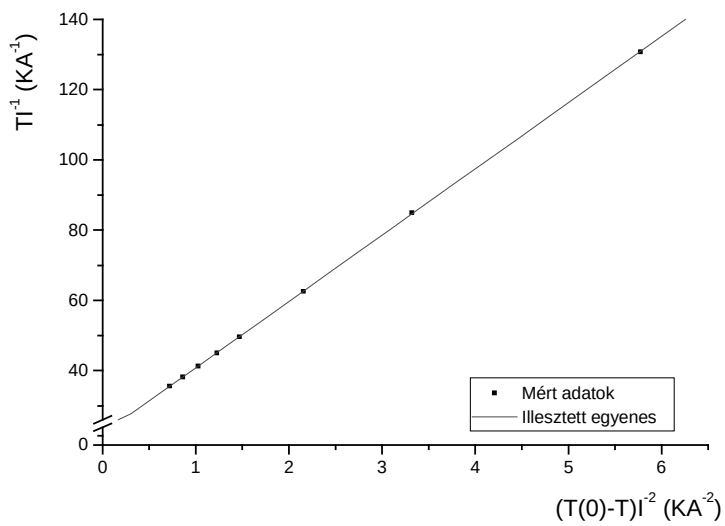
Mint a 4-es ábráról is leolvasható, ez teljesül, tehát az állítás igazolt. A 4-es ábrán látható pontokat a 4-es táblázat tartalmazza. Az illesztett egyenes egyenlete: y=21,95+18,86x.

$$T(I) = \frac{\frac{R_{AB}}{2\Lambda_{AB}} I^2 + T(0)}{\frac{S_{AB}}{\Lambda_{AB}} I + 1} \Rightarrow T(I) + \frac{S_{AB}}{\Lambda_{AB}} I T(I) = \frac{R_{AB}}{2\Lambda_{AB}} I^2 + T(0)$$

,

$$\frac{T(I)}{I} = \frac{R_{AB}}{2S_{AB}} + \frac{\Lambda_{AB}}{S_{AB}} \frac{T(0)-T(I)}{I^2}$$

Táblázat 4

$\frac{T(0)-T(I)}{I^2}$	$\frac{T(I)}{I}$
5,7750	130,80
3,3222	84,93
2,1563	62,55
1,4680	49,60
1,2264	45,02
1,0278	41,28
0,8615	38,20
0,7204	35,63

Ábra 4