

Mikrokaloriméteres mérőrendszer referencia paramétereinek meghatározása

Determination of reference parameters for a microcalorimeter measuring system

HARASZTOSI Lajos^{1,*}, KISS Rebeka Gy.¹, SZABÓ István A.¹
and BATTISTIG Gábor^{1,2}

¹ University of Debrecen, Institute of Physics, 18/B Bem sqr., Debrecen, 4019 Hungary

² HUN-REN Centre for Energy Research, Institute for Technical Physics and Materials Science, Konkoly Thege M. str.
29-33, Budapest, 1121 Hungary

¹ Tel.: +36 52 512 900, fax: +36 52 316 073

* E-mail: lajos.harasztosi@science.unideb.hu , www.unideb.hu

Abstract

A power compensated differential microcalorimeter has been previously developed at the Institute of Physics of the University of Debrecen [1,2,3]. To operate the measuring system, accurate initial parameters are required for the correct processing of the measured data. These parameters are the reference resistance and the temperature coefficient of the Pt heater/temperature sensor. The calculations giving the theoretical background for the measurements, the measurement system enabling the measurements manually or automatically, and the measurement results are presented.

Keywords: Microcalorimetry, Microheaters, Resistivity measurement, Thermal modell

Kivonat

A Debreceni Egyetem Fizikai Intézetében korábban kifejlesztettünk egy teljesítménykompenzált differenciális mikrokalorimétert [1,2,3]. A mérőrendszer által szolgáltatott mérési adatok helyes feldolgozásához, kiértékeléséhez pontos kiinduló paraméterekre van szükség. Ilyenek a Pt fűtőtest/hőmérsékletmérő szenzor referencia ellenállása, valamint hőmérsékleti együtthatója. Bemutatjuk a mérések elméleti háttérét megadó számításokat, a méréseket manuálisan ill. automatikusan lehetővé tévő mérőrendszert, valamint a kapott mérési eredményeket.

Kulcsszavak: mikrokalorimetria, mikrofüttőtest, ellenállás mérés, hőtechnikai modell

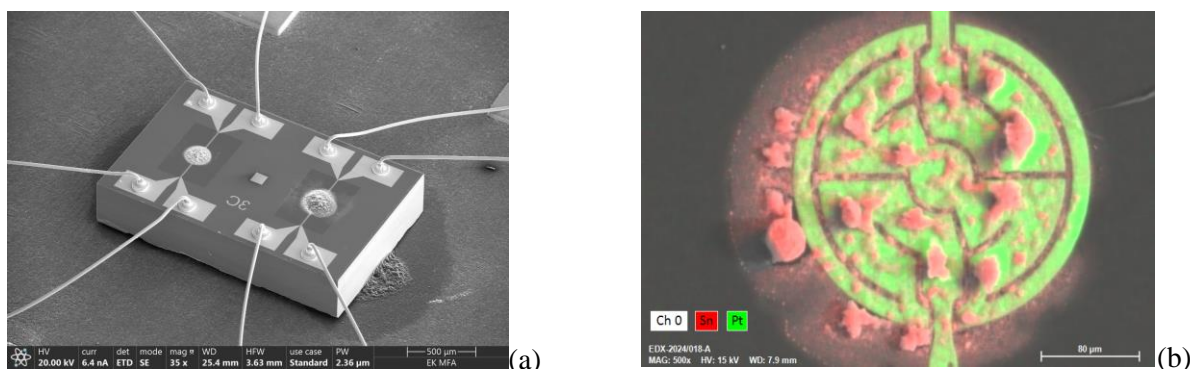
1. BEVEZETÉS

A teljesítménykompenzált mikrokaloriméterek anyagtudományi felhasználási területe széles, nagyon kis tömegű minták fázisátalakulásai, szilárdtest reakciók vizsgálhatók. A mikrokalorimetriás műszerekről és azok alkalmazásairól a közelmúltban készült részletes irodalmi összefoglaló, ami megtalálható az [4]-ben. Az általunk fejlesztett rendszer leírása az [1,2,3] irodalmakban található. A kaloriméter érzékelője az MFA Mikrotechnológiai laboratóriumában kifejlesztett kettős mikro fűtőtest. A minta és a referenciaanyag az izolált mikrofüttőtestek felületére helyezhetők. A mérőrendszerrel mérhető, az anyagra jellemző hőfelszabadulás/hőelnyelés csak akkor értelmezhető jól, ha a hőmérsékleti skálát kellő pontossággal határozzuk meg. Jelen munkában a tényleges kalorimetrikus mérés előkészítéséhez használható paraméterek meghatározásait mutatjuk be, a mérések elméleti háttérével és a mérőrendszer bemutatásával.

2. MEMS SENZOR ÉS MÉRŐRENDSZER

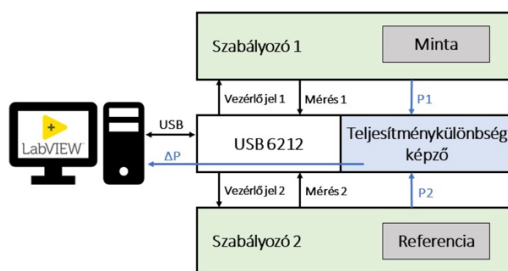
A MEMS szenzor és mérőrendszer pontos leírása az [1]-ben található. Az 1a ábrán a teljes chip, az 1b-n a fűtőtest felülnézete látható. Fontos kiemelni, hogy az izolált fűtőtest és a rajta lévő minta egy Si₃N₄ membránon található. A fűtőtest a 100 - 850 °C közötti hőmérséklet-tartományban ± 1-3 %-os eltéréssel

egyenletes hőmérséklet-eloszlást biztosít a mérőelem felületén. A Pt fűtőtest hőmérsékletét a fűtés közbeni ellenállásváltozásának pontos, négyvezetékes mérésével határozzuk meg. A 250 µm átmérőjű mikrofűtőtest felületén helyezkednek el a 200 nm vastag mérendő minták és referencia rétegek.



1. ábra Páztázó Elektronmikroszkópos képek: (a) a teljes kettős MEMS chipről, (b) a mikrofűtőtest felülnézeti képe felszakadozott Sn mintaanyaggal (b).

A mérőrendszer (2. ábra) két azonos, független analóg csatornát tartalmaz, amelyek egy-egy analóg szabályozási hurkot valósít meg. Az egyik csatorna a referenciához, a másik pedig a mintához van kapcsolva. A két szabályozási hurkot két különálló DA átalakító vezérli. Ez az elrendezés lehetőséget ad arra, hogy - kissé eltérő jelszintek alkalmazásával - a két szabályozási hurok elektronikáján és a Pt fűtő-mintarendszereken lévő eltérésekből adódó különbségeket kompenzáljuk. A vezérlőrendszer a teljes mérési folyamat során a fűtőelemeket a számítógép által beállított azonos hőmérsékleten tartja. A fűtőtestek - a hőmérséklet állandó értéken tartásához szükséges - teljesítményeinek különbsége, tartalmazza a minta átalakulási hőjére vonatkozó információt.



2. ábra A megvalósított mérőrendszer blokkvázlata

A fűtőtest ellenállása lineárisan arányos a fűtőelem hőmérsékletével, mivel a Pt fűtőelem hőmérsékleti együttható értéke 500 °C alatt állandónak tekinthető. A mérésekben használt kisméretű Pt fűtőtestek nagyon érzékenyek a fűtő áram nagyságára, 25mA fűtőáram felett az eszköz károsodhat.

3. A MÉRŐRENDSZER KALIBRÁLÁSÁHOZ SZÜKSÉGES PARAMÉTEREK

A platina fűtőtest/hőmérsékletszenzorok ellenállásának hőmérsékletfüggését a kitűzött mérési tartományban (0-500°C) lineárisnak vehetjük és az (1) egyenlettel adható meg.

$$R = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (1)$$

Az egyenletben szereplő mennyiségek: R_0 (a fűtőtest ellenállása T_0 hőmérsékleten), α (hőmérsékleti együttható), T (aktuális hőmérséklet), T_0 (kiindulási hőmérséklet: 0°C), ismeretében az R (a fűtőtest aktuális ellenállása T hőmérsékleten) értéke meghatározható. A hőmérsékleti skála készítéséhez (kalibráció) az (1) egyenletből kifejezhető T értékének meghatározása szükséges (2).

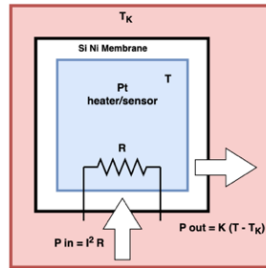
$$T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) + T_0 \quad (2)$$

Ehhez R , R_0 , α és T_0 ismerete szükséges. A mérőszoftver a hőmérsékleti skála előállításához fűtőtestenként kéri ezeket a paramétereket. Ezeknek a mennyiségeknek a meghatározását a tényleges kalorimetrikus mérés előtt, méréselőkészítésként kell megfelelő pontossággal elvégezni. A “megfelelő

pontosság” itt a hőmérsékleti skála pontossága, felbontása alapján értelmezhető. Ilyen pontossági célkitűzés lehet a $\pm 1^\circ\text{C}$, $\pm 0.5^\circ\text{C}$, $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Ennél nagyobb pontosság az alkalmazott mérő ill. mérés közbeni jelfeldolgozó elektronikától nem várható el. A méréselőkészítés során tehát ellenállás mérést, hőmérsékleti együttható meghatározást ill. hőmérséklet mérést kell végezni. A szenzor ellenállásának mérése szolgáló mérőáram megemelheti a fűtőtest-szenzor-minta hőmérsékletét, ami miatt az ellenállásmérés pontatlanná válhat. Elkészítettük a mérőchip hőtechnikai modelljét, meghatározhatóvá válnak a jellemző paraméterek, így a fűtőtest ellenállásának fűtőáram függése is. Meghatározható az alkalmazott mérőáram nagysága, az alapellenállás, a hőmérsékleti együttható, valamint az árammentes ellenállás értéke.

4. HŐTECHNIKAI MODELL, ÁRAMFÜGGÉS

A 3. ábra a mérőchip általános hőtechnikai modelljét mutatja.



3. ábra A mérőchip hőtechnikai modellje

A modell alapján felírható a rendszer teljesítmény mérlege (3). P: fűtőteljesítmény, T: fűtőtest hőmérséklet, T_K : környezeti hőmérséklet, K: hővezetési tényező, C: a rendszer fajhője

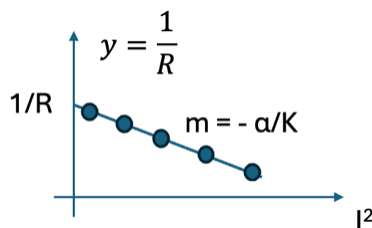
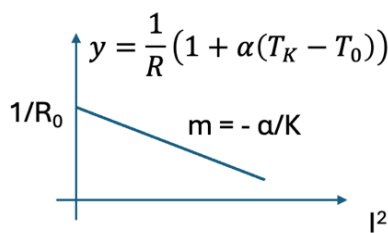
$$P - K(T - T_K) = C \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

A stacioner állapotban, az egyenlet jobb oldala nulla, $P_{IN} I^2$ -el arányos, ezért az (1)-ből kifejezhető R értéke. T_0 : R_0 mérési hőmérséklete, I: fűtőáram

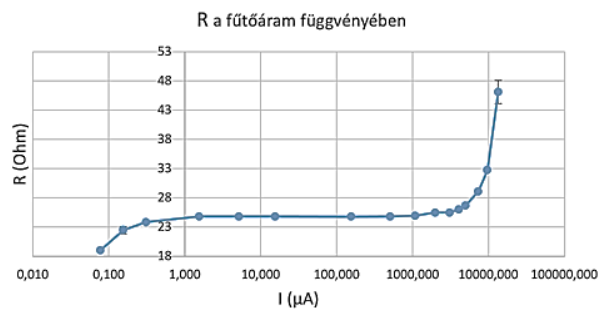
$$R = \frac{R_0(1 + \alpha(T_K - T_0))}{1 - R_0 \alpha \frac{I^2}{K}} \quad (4)$$

A (4) egyenlet szerint az R értéke az I^2 -tel arányos. A (4) egyenlet átrendezése után a kapott összefüggés megfelelő ábrázolással lineáris alakú (4.ábra, (5) egyenlet). termikus egyensúlyban: $T_K = T_0$.

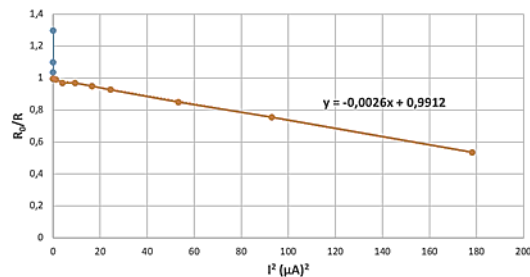
$$\frac{1}{R}(1 + \alpha(T_K - T_0)) = -\frac{\alpha}{K} I^2 + \frac{1}{R_0} \quad (5)$$



(a)



R_0/R az I^2 függvényében



(b)

4. ábra (a) általános eset: felső, termikus egyensúlyban: alsó; (b) valós mérési eredmények

A termikus egyensúlyi állapot méréséből meghatározható az un. árammentes R , α ismeretében a hővezetési tényező (K) értéke. Megállapítható, hogy ha az áram függvényében (5) ábrázolt adatok jól illeszkednek egy egyenesre, akkor a rendszerre meghatározott hőtechnikai modell érvényes. Ahol eltérés van, ott a modell érvényét veszti. Ez a helyzet figyelhető meg a 4.b ábra kis áramú tartományában, az R érték jelentősen csökken, aminek az oka igazolhatóan a mérőrendszerben meglévő sönt ellenállások hatása. Milyen áramnál kell mérni az R_0 ellenállást? Két ellentmondó követelmény van. Az egyik, hogy kellően nagy legyen az áram a söntölő hatás elkerülésére, valamint, hogy a feszültség jól mérhető legyen, de kellően kicsi, hogy a mérőáram ne fűtse jelentősen - és ezáltal megnövelje - a Pt szenzor/fűtőtest ellenállását. A 4.b felső ábrából ez az érték 10...100 μ A tartományra tehető. A méréseknél ezt az I értéket 15 μ A értékűnek választottuk. Ez az áram - a (2) egyenlet alapján kb. 0.17 $^{\circ}$ C-kal növeli meg a szenzor hőmérsékletét. Ez az érték a kitűzött legnagyobb T felbontóképességgel (0.1 $^{\circ}$ C) azonos nagyságrendbe esik. A fenti előzetes számítások és mérések alapján elkészíthető egy mérési protokoll, amivel -robosztus, több mérési pontra illesztéssel- meghatározható a fűtőtest árammentes ellenállása (R), a rendszer hővezetési tényezője K , valamint a Pt fűtőtest hideg ellenállásának (R_0) és a hőmérsékleti együtthatójának (α) mérésére használható mérőáram (I) nagysága.

5. A SZENZOR ELLENÁLLÁSÁNAK MÉRÉSE

A szenzor ellenállásának értékét az (1) egyenlet szerint lehet meghatározni. Az ebben szereplő $R_0 \cdot \alpha$ mennyiség, az ellenállás hőmérséklet függvény meredeksége előzetes információt ad az ellenállásmérés pontosságáról. Pl. Egy 100 Ω -os Pt hőellenállás az anyagra jellemző 0.0385 1/ $^{\circ}$ C-es hőfoktényezővel rendelkezik. Ebből kiszámítható, hogy 1 $^{\circ}$ C-os érzékenységhöz 0.385%-os relatív hibával kell mérni. (0.1 $^{\circ}$ C-os érzékenységhöz 0.0385%) [5.] A mérőrendszer hőmérsékleti skálájának meghatározásához a (2) egyenletből kell kiindulni és a T érték meghatározását az egyenletben szereplő összes mennyiség befolyásolja. Egy mennyiség, a T_0 mérésének vizsgálatától eltekintünk. (Az a hőmérséklet, ahol az R_0 értékét meghatározzuk, esetünkben 0 $^{\circ}$ C.) A T meghatározásának maximális abszolút hibáját (ΔT) a (6,7) egyenletek adják.

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial R} \Delta R \right| + \left| \frac{\partial T}{\partial R_0} \Delta R_0 \right| + \left| \frac{\partial T}{\partial \alpha} \Delta \alpha \right| \quad (6)$$

$$\Delta T = \left| \frac{1}{\alpha} \frac{1}{R_0} \Delta R \right| + \left| \frac{1}{\alpha} \frac{R}{R_0^2} \Delta R_0 \right| + \left| \frac{1}{\alpha^2} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right) \Delta \alpha \right| \quad (7)$$

Az előzetes mérések eredményeivel kapott paraméterek behelyettesítésével a (7) egyenlet az alábbi (8).

$$\Delta T = 13.4 \Delta R - 610 \Delta R_0 \quad (8)$$

Ebből kifejezve a ΔR -t az R mérés pontosságára vonatkozó összefüggést kapunk (9).

$$\Delta R = 0.074 \Delta T - 1.92 \Delta R_0 \quad (9)$$

Az (1) táblázat az ellenállás mérés hibáit (ΔR) tartalmazza, a kitűzhető ΔT mérési hibáknál. ΔR_0 : a 0 $^{\circ}$ C-on mért fűtőtest ellenállásának mérési pontossága

1.	$\Delta T \cong \pm 1^{\circ}\text{C}$	$\Delta R_0 = \pm 0.1\Omega$	$\Delta R = \text{negatív érték!}$
2.	$\Delta T \cong \pm 1^{\circ}\text{C}$	$\Delta R_0 = \pm 0.01\Omega$	$\Delta R = \pm 0.055\Omega$
3.	$\Delta T \cong \pm 1^{\circ}\text{C}$	$\Delta R_0 = \pm 0.001\Omega$	$\Delta R = \pm 0.072\Omega$
4.	$\Delta T \cong \pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$\Delta R_0 = \pm 0.01\Omega$	$\Delta R = \text{negatív érték!}$
5.	$\Delta T \cong \pm 0.1^{\circ}\text{C}$	$\Delta R_0 = \pm 0.001\Omega$	$\Delta R = \pm 0.0055\Omega$

1. táblázat ΔR mérési hibák

A kapott (nem negatív) eredmények azt mutatják meg, hogy a hőmérsékleti skála kalibrálása adott pontosságához milyen ΔR_0 és ΔT mérési pontosság szükséges. A táblázatban szereplő negatív értékek jelentése: nem lehetséges az adott feltétel teljesítése.

6. MŰSZERES ELLENÁLLÁSMÉRÉS ÉS ANNAK HIBÁJA

A négyvezetékes ellenállásméréshez megfelelően a Pt fűtőtest négy kivezetéssel készül. A mérőáram hatására a fűtőtesten eső feszültség értékéből a fűtőtest ellenállása, R meghatározható. A mérés elvégzéséhez két műszerre, megfelelő felbontóképességű árammérőre és feszültségmérőre van szükség. Az alapellenállás, R_0 mérésére használt 15 μ A és a hideg R_0 érték (20 Ω) szorzata 300 μ V. A mintán eső 300 μ V nagyságrendű feszültség közvetlen mérésére egy Keitley 181 nanovoltmérőt használunk, amely 2mV-os méréshatárával és 51/2 digités felbontásával alkalmas a mérésre. A mérőáram közvetlen mérése helyett egy ismert értékű sönt

ellenálláson eső feszültség mérését valósítottuk meg. A 100 kΩ-os ellenálláson a 15 μA mérőáram hatására ≈1.5V feszültség esik, ami egy 61/2 digités felbontású HP34401A multiméterrel, a 10V-os méréshatárban már megfelelően kis hibával mérhető.

A fűtőtesten eső feszültség mérésénél a pontosságot lerontják a hozzávezetéseken esetlegesen fellépő termofeszültségek és azok hőmérsékleti driftje. A mérőrendszerben többszörös különböző fém-fém kontaktusok vannak. Ezek egyenként akár 10...50 μV kontakt feszültségeket adnak a méréshez. Előfordulhat, hogy a mérni kívánt feszültség a termofeszültségekkel összemérhető, így egy „egyszerű” feszültségmérés - még ha több mérés átlagolásából is származik - nem alkalmas a feszültség pontos meghatározására. Ilyen esetekre már régóta alkalmazzák a mérőáram irányának többszöri megfordítását. Ekkor a normál és fordított irányú mérések átlagából kiesik a termofeszültség. A Keithley cég ajánlása szerint három mérést kell végezni váltakozó áramiránnyal, majd a kapott mérési eredményekből számítható ki a „tisztá” mérni kívánt feszültség. Ez a mérési módszer nem csak a statikus thermo- és offset feszültségek eltüntetésére alkalmas, hanem a lassú, lineáris drift feszültségre is immunis. [6]. Az ellenállás meghatározására szolgáló összefüggés (10).

$$R = V_R \frac{R_S}{V_{R_S}} \quad (10)$$

ahol V_R : a fűtőtesten eső feszültség, V_{R_S} : a sönt ellenálláson eső feszültség, R_S : a sönt ellenállása.

Az ellenállás meghatározás abszolút hibája a hibaterjedés alapján (11)

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial V_R} \Delta V_R \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial V_{R_S}} \Delta V_{R_S} \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial R_S} \Delta R_S \right| \quad (11a)$$

$$\Delta R = \left| \frac{R_S}{V_{R_S}} \Delta V_R \right| + \left| \frac{V_R R_S}{2V_{R_S}^2} \Delta V_{R_S} \right| + \left| \frac{V_R}{V_{R_S}} \Delta R_S \right| \quad (11b)$$

ahol ΔV_R : a fűtőtesten eső feszültség mérési hibája, ΔV_{R_S} : a sönt ellenálláson eső feszültség mérési hibája, ΔR_S : a sönt ellenállás értékének pontossága. A feszültség mérési hibák a felhasználni kívánt mérőműszerek adatlapjából kiolvashatók (2. táblázat). A sönt ellenállás 100kΩ-os ±0.01% tűrésű ellenállás.

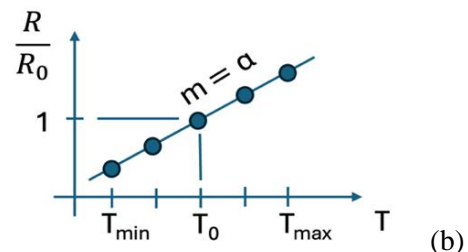
Műszer/eszköz	Méréshatár	Várható mérési érték	Mérési hiba:	$\Delta V / \Delta R$
HP 34401A	10V	1.5V	±(0.0020 % reading + 0.0005% range)	35 μV + 50 μV = ± 85 μV
Keithley 181	2mV	300 μV	±0.006% reading	±18 nV
Rs söntellenállás	---	100kΩ	± 0.01%	±10 Ω

2. táblázat Műszerek mérési hibái

Behelyettesítve az értékeket (11b) egyenletbe $\Delta R = \pm 1.4 \text{ m}\Omega$ értékre adódik, ami megadja, hogy mekkora hibával lehet az adott mérés technikával ellenállást mérni. Ezt az adatot kell összehasonlítani az 1. táblázat adataival. A kapott eredmények alapján lehetőség nyílik az 5. sorban található $\Delta T \cong \pm 0.1^\circ\text{C}$ cél elérésére is, így a hőmérséklet értékének ilyen pontosságú meghatározására.

$$\frac{R}{R_0} = (1 - \alpha T_0) + \alpha T \quad (12)$$

(a)



5. ábra Az α paraméter meghatározására alkalmas adatábrázolási formula (a) és ábra (b)

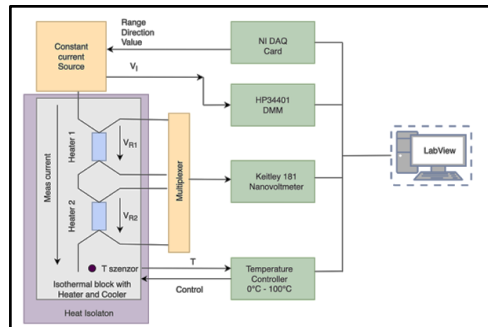
7. A PT FŰTŐTEST HŐMÉRSÉKLETI EGYÜTTHATÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA

A hőmérsékleti együttható meghatározásához ciklikusan változtatni kell a szenzor chip hőmérsékletét egy minimum értékről a lehetséges maximumig, közben pedig mérni kell a szenzor ellenállását. A kapott

adatok megfelelő ábrázolásából az együttható és annak hibája meghatározható. Az (1) összefüggésből kifejezhető az $R/R_0 = f(T)$ függvény (12) egyenlet, aminek a meredeksége az α -val jelölt hőmérsékleti együttható. (5.ábra) Az egyenletben szereplő R_0 a T_0 referencia hőmérsékleten (0°C) mért R érték. Az α paraméter meghatározásához a legkisebb négyzetek módszerével történhet.

8. MÉRŐRENDSZER ÉS LABVIEW SZOFTVER A MÉRÉSEKHEZ

A mérőrendszer (6.ábra) összeállításakor a korábban bemutatott elveket alkalmaztuk, lehetővé téve a mérni kívánt mennyiségek kellő pontosságú meghatározását. A mérőfej egy, a környezettől elszigetelt izotermikus blokkban helyezkedik el. Fűtéséről/hűtéséről Peltier-elemes számítógépes vezérlésű szabályzó gondoskodik. A hőmérséklet stabilitás jobb, mint $\pm 0.06^\circ\text{C}$. Minden R értéket legalább tízszer mérünk az átlag és szórás számításához.

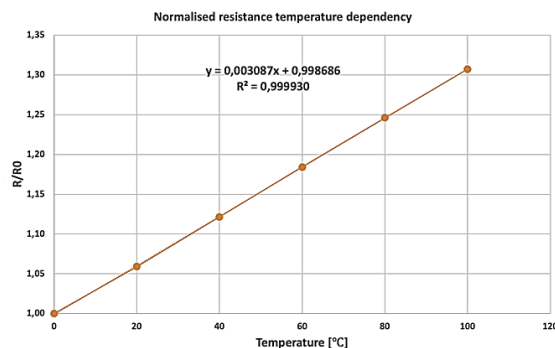


Mérőszoftver funkciók R_0 , T_0 és α meghatározásához:

- Mérőáram kezelés
- Feszültségmérés
- Ellenállás mérése, átlag, szórás számítás
- Hőmérséklet beállítás és mérés
- α meghatározása

6. ábra A mérésekhez kifejlesztett mérőrendszer HW komponensek és SW funkciók

A mérési sorozat 0°C -on kezdődik R_0 meghatározásával, majd 10°C -onként történtek mérések 100°C -ig. Az automatizált, számítógép vezérelt mérőrendszer az elméleti megfontolások által előírt pontossággal képes a szükséges paramétereket megmérni, illetve meghatározni. A 7. ábrán a hőmérsékleti együttható mérési eredménye látható.



7. ábra Hőmérsékleti együttható meghatározása

Az ellenállásmérés hibája a mérőrendszerből számítható $\Delta R = \pm 1.4 \text{ m}\Omega$ nagyságrendjébe esik, ezért az illesztés hibája nagyon kicsi. Az így meghatározható hőmérsékleti együttható értéke: $3.087 \times 10^{-3} \text{ 1}/^\circ\text{C}$. Ez az érték jelentősen kisebb, mint a tömbi anyagra jellemző $3.85 \times 10^{-3} \text{ 1}/^\circ\text{C}$, de jól illeszkedik a [4] -hez.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

Az általunk kifejlesztett mikrokaloriméter korrekt működéséhez megfelelő pontosságú kiindulási paraméterekre van szükség. Ezek a paraméterek nagymértékben befolyásolják a kapott mérési eredményeket. Meghatároztuk a mérések elméleti háttérét és kidolgoztunk egy mérőrendszert, amely ezen paraméterek mérését automatikusan biztosítja. A mérőrendszer, a vezérlése és a paraméterek nagy pontosságú meghatározása alkalmassá teszi a kifejlesztett mikrokaloriméter alkalmazását nagyon kis tömegű és térfogatú vékonyréteg rendszerekben lejátszódó fizikai folyamatok követésére.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott munkát részben az Innovációs és Technológiai Minisztérium TKP-2019-21 és TKP2021-NVA-03 kutatási projektjei fedezték.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] L. Harasztosi, I. A. Szabó, F. Biró, R.Gy. Kiss, G. Battistig, Microcalorimeter development and calibration based on a twin micro-heater platform, Proceedings of 8th International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumentation Advances (SEIA' 2022), Corfu, Greece, 2022
- [2] L. Harasztosi, I. A. Szabó, F. Biró, R.Gy. Kiss, G. Battistig, Temperature Calibration of Twin Micro-heater Based Microcalorimeter, Sensors & Transducers, Vol. 260, Issue 1, May 2023, pp. 7-13
- [3] R.Gy. Kiss, L. Harasztosi, I. A. Szabó, F. Biró, G. Battistig, Microhotplate as a platform for Calorimetry, Eurosensors Conference, XXXIV, Lecce, Italy, 10-13 September 2023
- [4] A.F. Lopeandia, J. Valenzuela, J. Rodriguez-Viejo, Power compensated thin film calorimetry at fast heating rates, Sensors and Actuators A Physical 143 (Journal Title, Vol. 143, Issue 2, 2008 pp. 256–264.
- [5] Nagy Dénes, *Hőmérsékletmérés*. Műszaki Könyvkiadó 1969, 95. oldal
- [6] Adam Daire, Low-Voltage Measurement Techniques, Keitley/Tektronix