

1. Hőmérsékleti sugárzás

(Visontai Dávid)

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Az ideális feketetest sugárzási törvénye	1
3. Hőmérsékletmérési módszerek	2
4. Mérési összeállítás	4
5. A mérőberendezés	5
6. Gyakorló kérdések	6
7. Mérési feladatok	7

1 Bevezetés

A XIX. század végén úgy hitték, új, nagy horderejű eredmények a fizikában már nem lesznek és csak kevés nyitott probléma van. Az egyik, még lezáratlan kérdés épp a hőmérsékleti sugárzás volt. A kísérleti adatok interpretálását sokan megkísérelték, de a legismertebb formulák, a Rayleigh-Jeans, vagy a Wien-féle sugárzási törvény, csak korlátozott hullámhosszintervallumon adott jó egyezést a kísérleti adatokkal. Végül 1900-ban a német Max Plancknak sikerült végleges megoldást találni a feketetest sugárzás problémájára. A hőmérsékleti sugárzással kapcsolatos felfedezéséért Wien 1911-ben kapott Nobel-díjat és Planck 1918-as Nobel-díjának indoklása: „szolgálatának elismeréseképp, amiatt a hatás miatt, amit kvantumelméletével a fizika fejlődésére gyakorolt”.

2 Az ideális feketetest sugárzási törvénye

Bármilyen, az abszolút nulla foktól különböző hőmérsékletű test elektromágneses sugárzást bocsát ki. A sugárzás oka, hogy az anyag töltései a hőmozgás következtében gyorsulnak, és a gyorsuló töltések az elektrodinamika törvényeinek megfelelően elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. A testek nemcsak kibocsátanak, hanem nyelnek is el fényt. A fekete test definíció szerint olyan tárgy, amely minden ráeső sugárzást elnyel,

függetlenül annak hullámhosszától. Az ilyen test sugárzása teljesen független az anyagtól, a sugárzás sajátosságait a test hőmérséklete szabja meg. Abszolút fekete test nem létezik, de jól közelíthető egy kormozott belső falú, zárt, üres dobozzal, és a test sugárzását az üreg falán vágott kis nyílásba helyezett szondával vizsgálhatjuk. Bármilyen más anyag termikus sugárzása Kirchhoff sugárzási törvénye alapján visszavezethető a fekete test sugárzására, ha ismerjük az adott test spektrális abszorpcióképességét. A számításokat, amelyek sok tankönyvben megtalálhatók, nem részletezzük, csak az eredményt közöljük. Az egységnyi felület által a felületre merőleges irányban, egységnyi térszögben és hullámhossz-intervallumban kisugárzott teljesítmény:

$$I_{\lambda}d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} d\lambda, \quad (1)$$

ahol c a fénysebesség, h a Planck-állandó, k a Boltzmann-állandó, T az abszolút hőmérséklet. Ezt az összefüggést Planck-formulának is nevezik. A Planck-formula integrálásával kapjuk Stefan–Boltzmann-törvényt, ami szerint egy T abszolút hőmérsékletű fekete test egységnyi felülete által kisugárzott teljesítmény:

$$P = \sigma T^4,$$

ahol

$$\sigma = \frac{4\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^{-4} \quad (2)$$

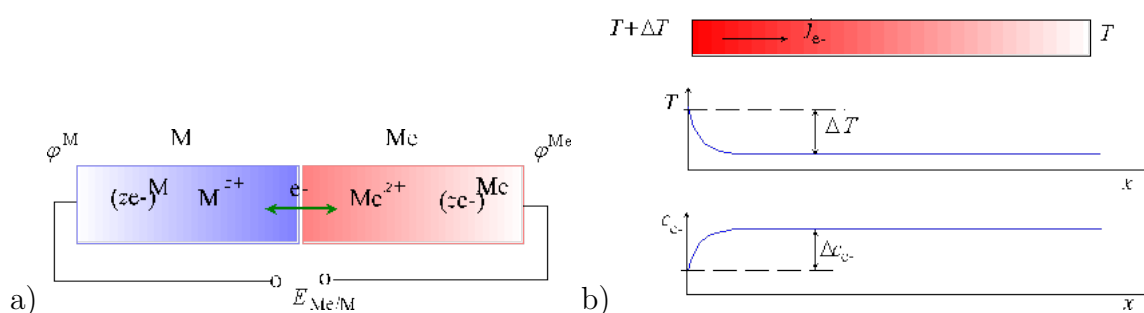
A mérési feladat a Stefan–Boltzmann-törvény igazolása és a σ állandó megmérése.

3 Hőmérsékletmérési módszerek

Az előttünk álló feladatok egyik lényeges része a nagyon pontos hőmérsékletmérés. Hőmérsékletet a hagyományos higanyos, vagy alkoholos folyadékos hőmérőkön kívül, többek között ellenállás-hőmérővel, termoelemmel vagy pirométerrel mérhetünk. Az **ellenállás-hőmérők** anyaga alacsony hőmérséklet detektálására félvezető vagy szén, magasabb hőmérsékletre az egyik legszélesebb körben alkalmazott fémhőmérő a platina hőmérő. A vékony platina szálat hengeres vagy lapos kerámiatokba helyezik el. Mérésekben leggyakrabban 0°C -on 100Ω -os ellenállás-hőmérőt használunk. Érzékenysége kb. $0,35\Omega/^{\circ}\text{C}$, és hőmérséklet-ellenállás függvénye jól közelíthető másodfokú polinommal. Pontos méréseknél az ellenállás-hőmérőket úgynevezett négy pontos elrendezésben használják, így lehet kiküszöbölni az árambevezető huzalok ellenállását. A két árambevezető kontaktus mellett közvetlenül a hőmérő lábán mérjük az ellenálláshőmérőn árammal és az ellenállással arányos feszültségét. Tehát áramgenerátort használva, a hőmérséklet a feszültséggel arányos. Az érzékenységet nem lehet az áram növelésével fokozni, mert a túl nagy áram miatt a hőmérő melededne.

A **pirométerrel** izzó anyagok hőmérsékletét határozhatjuk meg. Működési elve, hogy egy távcsőhöz hasonló optikai eszközt a céltárgyra irányítjuk és egy távcsőben lévő referencia szálat elektromosan úgy izzítunk fel, hogy azonos legyen a két szín. A műszer skáláján a referenciaszál hőmérséklete leolvasható. Tulajdonképp itt a referenciaszál ellenállását olvassa le a műszer. Nyilvánvaló, hogy ez a mérési mód kissé szubjektív, mert a szem nem tökéletes mérőeszköz.

A **termopár** vagy **termoelem** két különböző anyagú fémdrót (M és Me), amelyek végeit összehegesztik és az egyik szálat közepén elvágják és így a szabad végek között elektromos potenciálkülönbség alakul ki, amit kontaktpotenciálnak nevezünk ($E_{Me/M}$) (1.a) ábra). A kontaktpotenciál értéke hőmérsékletfüggő, ami azzal magyarázható, hogy



1. ábra. A Seebeck -effektus.

a fémekben az elektronok energiája függ a hőmérséklettől, de az egyes fémeknél a hőmérsékletfüggés eltérő. Ha egy fémes vezető két vége között ΔT a hőmérséklet-különbség, akkor a vezetőben elektronáram jön létre a nagyobb hőmérsékletű hely felől a kisebb felé mindaddig, amíg a vezető hossza mentén a hőmérséklet-eloszlásnak megfelelő egyensúly nem áll be. Ez a jelenség a Seebeck-effektus. A 1.b) ábra egy vezetőben a hőmérsékletet és az elektronok koncentrációját szemlélteti a vezető hossza mentén. Az M vezetőkét vége között az ún. abszolút Seebeck-koefficienssel (S_M) arányos elektromos potenciálkülönbség ($\Delta\phi_M$) lép fel.

$$\Delta\phi_{Me} - \Delta\phi_M = U_{Me-M} = (S_{Me} - S_M)\Delta T. \quad (3)$$

A termoelemek kis tömegű anyagok hőmérsékletének mérésére különösen alkalmasak, mivel vékony drótból készíthetők, hőkapacitásuk ezért kicsi. Alkalmazásukat viszonylag kis érzékenységük korlátozza, a legérzékenyebb termoelemek $50 \mu V/^\circ C$ nagyságrendűek.

Hangsúlyozandó, hogy az **ellenállás-hőmérő** abszolút hőmérsékletet mér, a **termoelem** pedig hőmérséklet-különbséget. Ezért az egyik végpontját (un. hidegpont) más módszerrel megmért hőmérsékletű hőtartályba helyezik és a valódi hőmérséklet a referencia hőmérséklet és a termoelem hőmérséklet-különbségének összege. Régebben általában olvadó jeget, vagy valamilyen más átalakuláshoz tartozó hőmérsékletet használtak a termoelemen hidegpontjaként. Manapság egy a félvezető ellenállásának hőmérséklet függésén

alapuló IC-t használunk. Ez a hidegpont abszolút hőmérsékletével arányos feszültséget ad, amelyet megfelelően egy egyszerű súlyozott összeadó áramkörrel hozzáadunk a termoelem feszültségéhez. Így a kimeneten már az abszolút hőmérséklettel arányos jelet kapunk.

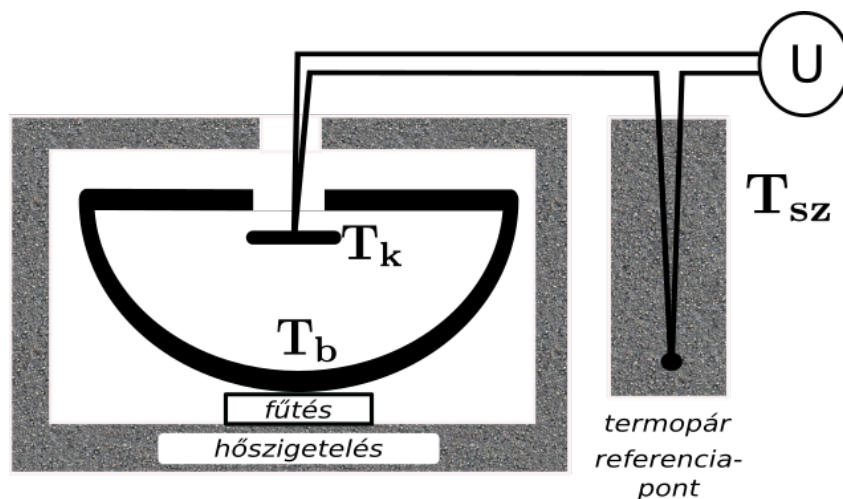
4 Mérési összeállítás

A mérés során úgy vizsgáljuk meg Stefan–Boltzmann törvény szerinti hőmérsékleti sugárzást, hogy a 3. ábrán mutatott dobozban levő bekormozott félgömb alakú edényt T_b hőmérsékletre fűtjük fel, majd a felfűtés után az edény fölötti nyílás tetejére egy detektort helyezünk. A detektor kisméretű kormozott vékony fémlap, melyre termoelemet hegesztettünk (továbbiakban szonda, 4. ábra). Az elrendezés sematikus rajza a 2. ábrán látható.

A szonda bekormozott felülete a fűtött edény által kisugárzott hőt elnyeli, de a saját T_k hőmérsékletének megfelelően kifelé is sugároz. Ugyanakkor a szonda két végpontja között hő áramlik, ezért egyensúlyban a három hatást így írhatjuk fel:

$$\epsilon\sigma A(T_b^4 - T_k^4) = \alpha(T_r - T_k) \quad (4)$$

ahol ϵ a kormozott felület abszorpciós/emissziós tényezője, amit most 1-nek veszünk. α a szonda vezetékének hővezetési együtthatója, T_b az edény hőmérséklete, T_k a szonda kormozott felületének és T_r a szonda referenciapontjának hőmérséklete.



2. ábra. Az ábrán látható félhenger alakú edényt hevítjük T_b hőmérsékletre. A mérőszonda egyik, kormozott fele a kályhában van és T_k hőmérsékletű, míg a másik fele T_r szobahőmérsékleten van.

A szonda vezetékének végei között a hőmérséklet-különbség a Seebeck-effektus hatására feszültségkülönbséget eredményez:

$$S(T_r - T_k) = U \quad (5)$$

ahol S a Seebeck-együttható. Ezt az U feszültséget olvashatjuk le a mérődoboz kijelzőjéről.

Az egyenlet átrendezésével egyrészt azt kapjuk, hogy a mért feszültség

$$U = \frac{S\sigma A(T_b^4 - T_k^4)}{\alpha} \quad (6)$$

és ha elhanyagoljuk a kormozott felületről való kisugárzást, akkor

$$U \sim T_b^4. \quad (7)$$

Másrészt, ha megmérnénk A -t, a kormozott felület nagyságát, ismernénk α -t és S -et, akkor ki tudnánk számolni σ -t

$$\sigma = \frac{\alpha U}{SA(T_b^4 - T_k^4)}. \quad (8)$$

5 A mérőberendezés

A 3. ábrán látható doboz tartalmaz egy félgömb alakú delül kormozott edényt, amelyet egy hűtő- és szigetelőréteg vesz körül.

A edény hőmérsékletét a 5. ábrán található potméterrel lehet szabályozni. Az edény fűtésének bekapcsolásához a mérőkészülék zöld START gombját kell megnyomni. Figyeljünk arra, hogy induláskor a beállított hőmérséklet a mérendő értékek közül a legalacsonyabb legyen, mivel a rendszer nagyon lassan hül vissza. Figyeljünk továbbá arra is, hogy az épület hűtőrendszerével összekapcsolt vízvezeték ki legyen nyitva! Ez azért fontos, hogy az edényt körülvevő burkolat ne forrósodjon át. Magát a hőmérsékletet egy bekalibrált termoelem méri. Ennek értékét az 5. ábrán látható doboz kijelzőjéről olvashatjuk le. A hőmérsékleti sugárzást egy másik termoelemmel (4. ábra) mérjük.



3. ábra. Az edényt tartalmazó doboz.



4. ábra. A hősugárzás mérésére szolgáló termoelem vagy szonda. A kormozott felület hatékonyabbá teszi az elnyelést, amit egy kis keret védi nehogy lekopjon róla.

6 Gyakorló kérdések

1. Mit mond a Stefan–Boltzmann törvény?
2. Mi a Seebeck-effektus?
3. Milyen eszközökkel lehet magas ($> 200\text{ °C}$) hőmérsékleteket mérni?
4. Mi az előnye és hátránya a platina és a termoelem hőmérőknek?
5. Milyen hőhatások érik a szondát és mennyire elhanyagolhatók ezek a hatások?
6. Hogy méri meg a Stefan–Boltzmann-állandót?



5. ábra. Az edény fűtését szabályozó és a szondán eső feszültség mérését végző készülék.

7. Milyen további adatok kellenek a szondáról, hogy ki lehessen mérni a σ együtthatót?

7 Mérési feladatok

- Mérje meg a szondán kialakuló feszültség értékeket $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ között 10 pontban. Amíg az edény melegszik a szondát vegye ki és a mellékelt fedővel zárja le a nyílást. Amikor a hőmérséklet beállt helyezze be a szondát. Megjegyezzük, hogy a tényleges beállt feszültség néhány fokkal eltérhet a beállított értéktől. Ez nem okoz problémát ha a mért hőmérsékletet használja a kiértékelésnél. A szonda behelyezésétől a termofeszültség leolvasásáig számított idő mindig ugyanannyi legyen, 4-5 perc!
- Két hőmérséklet értéknél mérje meg a feszültség időbeli változását körülbelül 2 másodpercenként mintavételezve. Ha kell, akkor ismétlje meg a mérést, a szonda gyorsan lehül.
- Mutassa meg, hogy milyen arányosság van a mért feszültség és az edény hőmérséklete között! Érvényes-e a Stefan–Boltzmann törvény?