

3. Atomok gerjesztési potenciálja

Kovács György

2013. április

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. A Franck–Hertz-cső	2
3. A mérés menete	5
4. Gyakorló kérdések	7
5. Mérési feladatok	8

1. Bevezetés

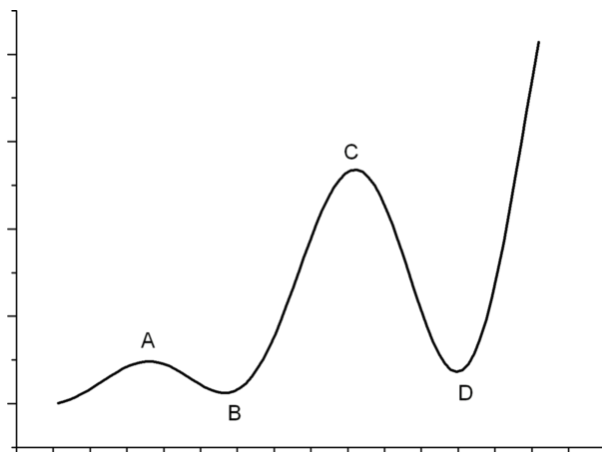
Az atomok belső szerkezetének megismerése mindig izgalmas kérdés volt, de csak az 1900-as évek elején születtek meg azok a modellek és elméletek, amelyek kielégítően magyarázták az atom szerkezetét. Ugyan Niels Bohr 1913-ban publikált atommodellje a mai ismereteink szerint már nem teljesen kielégítő, mégis elég sok jelenség leírására alkalmas. A modell egyik legfontosabb állítása az, hogy az atom elektronjai olyan pályákon keringenek, amelyek energianívói diszkréték és egy elektron alacsonyabb energiaszintről magasabb szintre juttatásához a két szint különbségének pontosan megfelelő energia szükséges. A spektroszkópiai kísérletek mellett a Bohr-modell nagyon fontos kísérleti bizonyítéka James Franck és Gustav Hertz német fizikusok 1914-ben Berlinben elvégzett mérése, amelyért 1925-ben Nobel-díjat kaptak. A mérés során tulajdonképpen ezt a kísérletet ismételjük meg annyi bővítéssel, hogy mi a neon atomok gerjesztési potenciálját is megvizsgáljuk, míg Franck és Hertz eredetileg csak higannyal mértek.

2. A Franck–Hertz-cső

A Franck–Hertz-cső egy módosított elektroncső, amelyben vákuum helyett a vizsgálandó anyag kisnyomású gáza vagy gőze van. Eredetileg az elektroncső elektronok vezérlésén alapuló eszköz, amely főleg az elektronikában egyenirányításra, és erősítésre szolgált. Elektródáit üvegburában helyezik el, és ez egyúttal védi a külső levegőtől is. Az elektroncsőben rendszerint egyetlen katód van, ezenkívül az elektroncső rendeltetésétől függően további elektródák, de legalább még egy elektróda. A katód speciális anyaggal bevont elektróda, amelyet közvetlenül vagy közvetve fűtenek. A forró katódból termikus emisszió hatására kilépő elektronok zárt áramkör létrehozása esetén elérik az elektroncső másik végén elhelyezkedő elektródát, az anódot, és az anódba csapódva elektromos áramot hoznak létre, amely áramot a katód és az anód közé elhelyezett hálós szerkezetű elektródákkal módosítani lehet. Első közelítésben a Franck–Hertz-cső egy 3 elektródás cső, amiben kis nyomású neon gáz, illetve higany gőz és folyadék fázisa található. A neon gáz sűrűsége nem szabályozható, a higany gőz sűrűsége a cső melegítésével növelhető. Először vizsgáljunk meg egy anódból és katódból álló vákuumcsövet. Tételezzük fel, hogy a katódból kilépő elektronok sebességeinek statisztikus ingadozása elhanyagolható. Pozitív anódfeszültség esetén minden elektron eléri az anódot, és negatív zárófeszültséget alkalmazva nem lenne anódáram. Az áram erősen függ az anódfeszültségtől, aminek az oka, hogy a katódból kilépő elektronok a katód előtt tértöltést hoznak létre, és akadályozzák a katódból az elektronok kilépését. Ugyancsak befolyásolja az anódáramot a katód és az anód anyagának különbségéből származó kontaktpotenciál, valamint az elektronok kilépési munkáját csökkentő tér. Közelítőleg az anódáram a feszültség $3/2$ -ik hatványával arányos. Ha az anódhoz közel beiktatunk egy g_2 gyorsító rácst, aminek kialakítása hálószerű, akkor a rácsfeszültséggel is vezérelhető az anódáram. A rácson keresztül hala-

dó elektronok kinetikus energiája eU , a rácsfeszültség és az elektron töltésének szorzata. Az elektronok a rácson keresztül haladnak és elérik az anódot. Ha az anódot valamilyen potenciálra kötjük, akkor zárt áramkört alakítunk ki, és mérhetjük az anódáramot. A pozitív anód feszültsége gyakorlatilag nem befolyásolja az áramot, mert a vezérlést a rács veszi át. Az áram még akkor sem változik, ha a rács és az anód közt olyan kis ellenteret alakítunk ki, amely lassítja az elektronokat. Természetesen nagyon nagy ellentér esetén az elektronok nem tudják legyőzni a potenciálgátat, és nem érik el az anódot. Fontos megjegyezni, hogy ellentétben az ellenállásból és telepből álló áramkörrel, ahol az áram arányos a feszültséggel, itt más a helyzet. A fékező, vagy gyorsítótér ugyan megváltoztatja az elektronok sebességét, de időátlagot véve az áram állandó és csak a katódból kilépő elektronok számától függ. Azok az elektronok, amelyek nem érik el az anódot, a rácson keresztül zárják az áramkört. Igazándiból csak vákuumcsövek esetén igaz a fenti fejtegetés, gázzal töltött csövek esetén az elektron ütközik a gáz atomokkal. Gázzal töltött cső esetén, ha a gyorsító rácstra a katódhoz képest **kis** pozitív feszültséget kapcsolunk, ezáltal az elektronok kinetikus energiája egy kritikus értéknél kisebb, akkor az elektron a gáz atomokkal rugalmasan ütközik. Az ütközés következtében az elektron impulzusa jelentős mértékbe változhat, de kinetikus energiájának változása elhanyagolható. Nagyon sűrű gőz esetén a szabad úthossz lecsökken, az ütközések száma oly mértékben megnő, hogy az elektronok kinetikus energiája már észrevehetően csökken, és ha az anód a rácshoz képest negatív potenciálú, akkor az anódáram is csökken. A továbbiakban alacsony nyomású higanygőz vagy neongáz esetét vizsgáljuk, és kezdjük el a rács feszültségét növelni. A feszültség növekedésével az tapasztaljuk, hogy az áram egy maximumot elérve csökkenni kezd és további feszültség növelés után egy minimumot elérve ismét növekszik, és ez a rácsfeszültség növekedésével periodikusan ismétlődik, ahogy az **1.** ábrán látható. Az elektronok a rácsfeszültség növelésével elérnek egy akkora kinetikus energiát, hogy kölcsönhatva az atommal, képesek az atom egyik belső elektronját egy külső magasabb energiájú állapotba juttatni. A jelenség egy rugalmatlan ütközéshez hasonló, az ütköző elektron energiát ad át a másik testnek, azaz a Hg vagy Ne atomnak, és közben energiát veszít. Az első maximum, az ábrán **A**-val jelölt pont, azt jelenti, hogy addig az elektronoknak éppen nincs még elegendő energiájuk, hogy a gázatomokat gerjesszék. A rácsfeszültség növekedésével az a rácstól való távolság a katód irányába, amelyen belül az elektronok a gerjesztéshez szükséges energiánál nagyobb energiával rendelkeznek nő és így a rugalmatlan ütközések száma is nő. Ha az anódra a katódhoz képest állandó negatív feszültséget kapcsolunk, az állandóság fontos, akkor az áramban csökkenés lesz látható, mivel az ütköző elektronok kinetikus energiája nem elég a záró potenciál legyőzéséhez. A gyorsító potenciál további növelése viszont azt eredményezi, hogy ugyan egyre több elektron ütközik rugalmatlanul, mert nő az a térfogat, ahol ütközhetnek, de ütközés után már az energiavesztés dacára is lesz annyi energiájuk, hogy legyőzzék a potenciálgátat. Ennek felel meg az ábra **B** pontja. A gyorsító feszültség növelésével azonban az elektronok energiája elegendő arra, hogy kétszer is ütközzenek, ekkor az energiájuk olyan mértékbe csökken, hogy nem tudnak a záró potenciál miatt eljutni az anódhoz, és ekkor

jelenik meg a második maximum és minimum, a **C** és **D** pont. A további maximumok és minimumok jelenléte is így magyarázható.



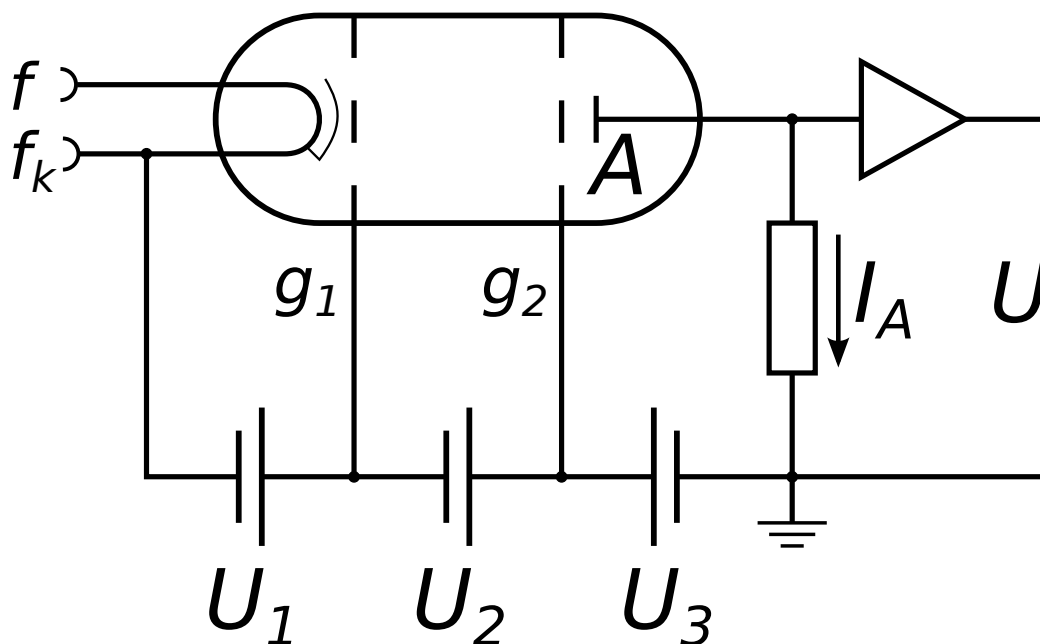
1. ábra. A Franck–Hertz-cső rácsfeszültség–anódáram karakterisztikája

Felvetődik a kérdés, hogy miért csak az első gerjesztési potenciált detektáljuk, és van-e lehetőség magasabb gerjesztések vizsgálatára. Ha egy rácsot használunk, és a rácsfeszültsége nagyobb, mint második gerjesztési potenciál, de az elektronok egy bizonyos útszakaszt akkor is olyan energiával tesznek meg, ahol az energiájuk még kisebb, mint a második, de meghaladja az első gerjesztési potenciál értékét. Ekkor az elektronok jelentős része a gáz atomjait első szintre gerjeszti és utána már nem képes gerjeszteni, vagy ha elég nagy a gyorsító potenciál, akkor többször is történik gerjesztés, de ismételten az első gerjesztési szintre. Magasabb gerjesztési potenciálok kiméréséhez Franck és Hertz két rácsos elrendezést használt. Még egy rácsot kell elhelyezni a g_2 és a katód közé. A g_1 rács katódtól való távolságát úgy kell megválasztani, hogy ez a távolság kisebb legyen, mint az elektronok átlagos szabad úthossza. A második rácsot ugyanolyan potenciálra kapcsoljuk, mint az g_1 -et. Ekkor a katód és az g_1 közötti térrészben az elektronok felgyorsulnak és elérik a magasabb gerjesztéshez szükséges kinetikus energiát, és a két rács közti térrészben ütköznek. Természetesen az anód a rácsokhoz képest negatív potenciálú. Az elektronok a katód és g_1 közt csak jelentéktelen mértékben ütköznek. A rácsok közti távolságnak jóval nagyobbnak kell lenni, mint az átlagos szabad úthossz így az ütközések a két rács közt történnek. Ebben az esetben a gyorsító feszültség–áram karakterisztika eltér az első ábrán látható görbétől. Itt is csúcsok és minimumok lesznek, de a csúcsok helye az első és második gerjesztési potenciál értékeinek lineáris kombinációja lesz, azaz $a, 2a, a + b, 2b, 3a, 2a + b, 2b, \dots$ értékek esetén detektálunk csúcsokat, ahol a és b az első és második gerjesztési potenciál értékét jelentik. Itt jegyezzük meg, hogy az atomok csak rövid ideig maradnak gerjesztett állapotban, utána az alacsonyabb állapotba visszakerülő elektron az energiakülönbségnek megfelelő energiájú fotont bocsát ki, és így a gerjesztési energia spektroszkópiailag is meghatározható. Ha az ütköző elektron energiája elég nagy,

képes ionizálni az atomot, azaz pozitív ion és egy további negatív elektron keletkezik. Az ionizáció megnöveli az anódáramot, de az ionok ellenkező irányba a katód felé mozognak, és a katódra csapódva tönkreteszik azt.

3. A mérés menete

A mérőberendezés fő része a Franck–Hertz-cső, amely speciális foglalatba van helyezve és a neonos csőnél a foglalat panelján feltüntetettük a elektródák neveit, higanyos csőnél pedig a banándugós kivezetéseken olvasható az elektródák neve. A cső vázlata a 2. ábrán látható. A katód fűtése f és f_k pontok közt 6,3 V szabvány feszültséggel történik. Ezt a feszültséget fokozatosan adjuk a katódra, hogy meggátoljuk egy hirtelen feszültséglökésből adódóan a fűtőszál eléégését. A csövek nagyon drágák és nem javíthatók.



2. ábra. A Franck–Hertz-cső vázlata

A g_2 rács szolgál az elektronok gyorsítására, a neonos csőre 80 V, a higanyosra pedig 40 V maximális feszültség adható. A g_1 rács kétféle szerepet tölthet be. Ha az első gerjesztési szintet vizsgáljuk, akkor a tértöltés elszívására szolgál, és a második rács a gyorsító rács. A második esetben azonos potenciálra kötve, mint g_2 -t, a magasabb gerjesztési szintek kimérését teszi lehetővé. Ebben az esetben a rácsokra sosem szabad a gerjesztési szintnél nagyobb feszültséget adni a cső begyűjtésének veszélye miatt. Lányegében az első gerjesztési szintek mérése esetén is nagy rácsfeszültség esetén van io-

nizáció, de ez kismértékű. Az anódra a rácshoz képest negatív feszültséget kell kapcsolni, és miután nagyon kis áramokat kell mérni, esetenként csak néhány száz pikoamper, ezért nagyon érzékeny árammérőt kell használni. A méréshez árnyékolt BNC kábelt használunk. A kábel belső, meleg pontja csatlakozik az anódhoz, a külső árnyékolás pedig a cső külső foglalatához. Az ampermérő meleg pontját rácsatlakoztatjuk a cső anódkiemenetéhez, mint az ampermérő bemenetének a másik kontaktusa a hidegpont, és ehhez a föld ponthoz kell kötni az **g₂** rácshoz képest negatív feszültségű tápegységet. . Az ampermérő kis ellenállása miatt, ezáltal az anód azonos potenciálra kerül, mint a föld pont és a második rácshoz képest negatív lesz. Látható, hogy a méréshez 4 szabályozható tápegységet kell használni. Fontos, hogy bekapcsolás előtt és a mérés befejezésével minden tápegységet 0 feszültségre állítsunk. **A neonos cső, a tápegységek és az ampermérő bekötése után mérésre kész, de a higanyos csövet először melegíteni kell. Ehhez egy csőkályhát használunk.** A kályha hőmérsékletét platina ellenálláshőmérővel mérjük. Az ellenállásmérést egy a számítógéppel összekötött digitális műszer végzi. A hőmérséklet szabályzás a mérőprogram beindításával elindul, és a számítógépes kijelzés egyik ablakában látható a kályha pontos hőmérséklete. **A melegítés azért szükséges, hogy a higanyos csőben lévő higany egy részét elpárologtatva, megfelelő koncentrációjú higanygőz legyen a csőben, amivel a szabad úthosszat és az ütközések számát szabályozhatjuk. Kis koncentráció esetén az anódáram nagy, de a cső hamarabb begyűjthet, ami által kevesebb maximumot detektálhatunk. Túl meleg kályha, azaz nagy koncentráció esetén pedig az anódáram nagyon kicsi, ezáltal nehezen detektálhatók a maximumok és minimumok pontos helye.** Neonos cső esetén nincs lehetőségünk a koncentráció melegítéssel történő növelésére. Az árammérő és a rácsfeszültségek detektálását végző digitális műszerek szintén a számítógépre vannak kötve, és gombnyomásra tárolják a rácsfeszültséget és a hozzá tartozó áramértékeket. A pontos mérés előtt van lehetőség a feszültség-áram karakterisztika vizuális érzékelésére oszcilloszkóp segítségével. Ezt a funkciót csak az első gerjesztési potenciál meghatározására használja, azaz az első rácstra csak kis feszültséget szabad kötni. A tápegység funkció kapcsolóját automatikus vezérlésre kapcsolva a **g₂** rácstra periodikus jel jut. Az oszcilloszkópot xy üzemmódon használva a bemenetekre a rácsfeszültséget illetve az anódáramot kösse. Az oszcilloszkóp bemeneti ellenállásán eső feszültség arányos lesz az anódárammal, a vízszintes eltérítés pedig a rácsfeszültséggel. Az első gerjesztési potenciál mérésekor a maximumok távolsága nagyjából egyenlő, de az első maximum értéke nagyobb, mint a különbségek. Ennek magyarázata az, hogy a katód és anód más anyagból készül és így a két fém közti kontaktpotenciál eltolja az első maximum helyét. Az első gerjesztési potenciál meghatározásakor az anódáramot és a maximumok és minimumok élességét erősen befolyásolja az első rác és a zárófeszültség értéke, higanyos csőnél a hőmérséklet is. Egyes esetekben maximumok vagy minimumok helyett csak a meredekségben történő változást, esetleg inflexiós pontokat látunk.

4. Gyakorló kérdések

1. Nagyságrendileg mekkora a gőz–folyadék fázis kritikus hőmérséklete Hg és Ne esetében?
2. Miért nem tudjuk a neonos csőben a koncentrációt melegítéssel változtatni?
3. Hogyan határozható meg a kontaktpotenciál?
4. Milyen ütközések történnek a Franck–Hertz-csőben?
5. Mi a kapcsolat a Bohr-modell és a Franck–Hertz-mérés eredményei közt?
6. Milyen elektródák vannak a Franck–Hertz-csőben?
7. Miért kell a katódot fűteni?
8. Milyen feszültséget kapcsolunk az anódra és miért?
9. Hogyan mérjük meg az első gerjesztési potenciált?
10. Hogyan mérjük meg a magasabb gerjesztési potenciált?
11. Mit értünk a Franck–Hertz-cső esetén begyűjtáson?
12. Mi történik azokkal a töltésekkel, amelyek nem az anódon távoznak?
13. Mi történik a gerjesztett atomokkal?
14. Hogyan befolyásolja a mérést, ha az elektródák síklapok vagy koncentrikus hengerpálást alakúak? Utóbbi esetben belül van a katód.
15. Mi a különbség az ionizáció és a gerjesztés közt?
16. Milyen legyen a szabad úthossz az első és magasabb gerjesztési potenciál mérésekor?
17. A g_1 rácstra kis feszültséget adva, hogyan függ az áram a második rács feszültségétől?

5. Mérési feladatok

1. Mérje meg az első gerjesztési potenciált neonos cső több záró feszültségnél és első rácsfeszültségnél a mérésvezető által megadott paraméterekkel!
2. Végezze el az előző mérést higanyos cső esetén is, több különböző hőmérsékleten!
3. Határozza meg a maximumok és a minimumok különbségéből az első gerjesztési potenciál értékét, annak hibáját!
4. Számítsa ki milyen hullámhosszú és frekvenciájú foton keletkezik a gerjesztett elektron visszaugrásakor!
5. Határozza meg a kontaktpotenciál értékét!
6. Precíz árammérés és szerencsés g_1 feszültség esetén kis extra maximumot és minimumot észlel. Ez a második gerjesztési potenciál. Próbálja megbecsülni ennek értékét!
7. A mérésvezető segítségével mérje meg a magasabb gerjesztési potenciálokat is! Ekkor a két rácsot azonos potenciára kapcsolja!
8. A higany és a neon termsémáiból határozza meg, hogy milyen átmeneteket mért!
9. Számolja ki, egy-egy ütközéskor energiájának hány százalékát veszíti el az elektron neon illetve higany esetén!