

3. ATOMOK GERJESZTÉSI POTENCIÁLJA (FRANCK-HERTZ KÍSÉRLET)

Kalácska Szilvia

Groma István

2016. szeptember



Tartalomjegyzék

	Oldal
1. Bevezetés	1
2. Elméleti összefoglaló	1
2.1. A Franck-Hertz cső	1
2.2. A mérés fizikai háttere	3
2.3. Az elektronok rugalmatlan szóródása	4
3. Mérési összeállítás	5
4. A mérés menete	7
5. Feladatok	8
6. Ellenőrző kérdések	9
7. Irodalomjegyzék	9

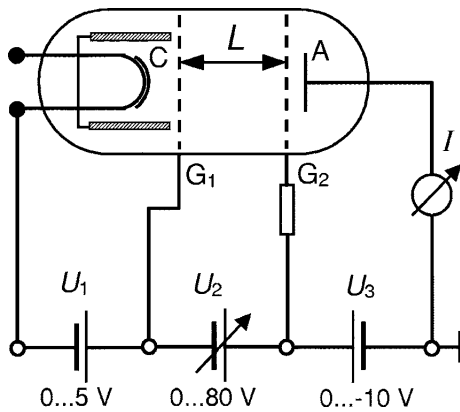
1. Bevezetés

1913-ban Niels Bohr bevezetett egy planetáris atommodellt, melyben azt feltételezte, hogy a szabad atomok pozitív töltésű magból és a körülötte meghatározott energiaszintű pályákon keringő elektronokból állnak. Modelljében az elektronok csupán úgy nyerhetnek vagy veszíthetnek energiát, ha egyik pályáról a másikra ugranak, ebből következően pedig az elektronok energiája diszkrét értékekre korlátozódik. Röviddel Bohr elmélete után, 1914-ben James Franck és Gustav Hertz publikálta kísérleti eredményeit, amely meggyőzően bizonyította a Bohr-féle kvantált energiaszintek helyességét. Ugyan az eredeti Bohr-féle atommodell mai ismereteink szerint már nem teljesen kielégítő, mégis számos jelenség leírására alkalmas.

Franck és Hertz kísérletükben termikusan gerjesztett elektronokat gyorsítottak higanygőzt tartalmazó csőben, és azt találták, hogy egy bizonyos gyorsító feszültség alatt (kb. $4,9\text{ V}$) az elektronoknak nincs elég kinetikus energiájuk ahhoz, hogy a higany atomok elektronjait gerjesszék. A kritikus feszültséget elérve és afölött már rugalmatlan ütközéssel gerjeszthetőek a higany atomok, amelyek a gerjesztés hatására a többlet energiát az ultraibolya tartományba eső fotonok formájában sugározzák ki. A laboratóriumi gyakorlat során ennek a kísérletnek a reprodukciójára kerül sor higany és neon esetében.

2. Elméleti összefoglaló

2.1. A Franck-Hertz cső



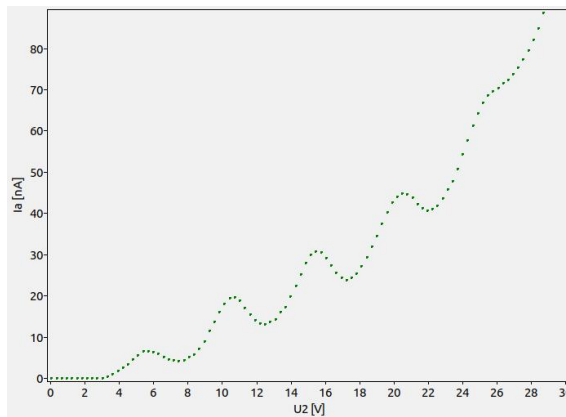
1. ábra. A laboratóriumi mérési összeállítás sematikus ábrája [1].

(U_3) alkalmazunk, aminek igen fontos szerepe van a kísérletben. Segítségével csupán azok az elektronok érhetik el az anódot (és vehetnek részt az áram folyásában),

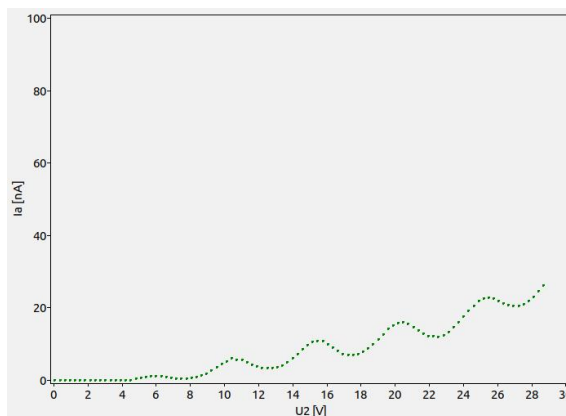
A mérési összeállításban szereplő Franck-Hertz cső sematikus ábráját láthatjuk az 1. ábrán. A cső tulajdonképpen egy olyan trióda, amely egy termikusan fűtött katódból (C), egy anódból (A) és rácyszerű elektródákból (G_1 és G_2) áll. Az üveg cső belső részében alacsony nyomású gőz (esetünkben higany, ill. neon) található, az egész pedig egy szabályozható hőmérsékletű kályhával van körülvéve. A katódban a fix (kb. 4 V -os) fűtési feszültséggel elektronok keletkeznek, ezek számát az U_1 feszültséggel szabályozhatjuk, majd U_2 gyorsító feszültséggel indítunk útnak az anód felé, a gőz atomokkal kitöltött téren keresztül (ezáltal az energiájuk $e \cdot U_2$). Az anód és az elé helyezett G_2 fém rács között negatív ellenfeszültséget

amelyek energiája nagyobb volt, mint $e \cdot U_3$. Ha nem alkalmaznánk ezt az ellenfeszültséget, akkor minden elektron képes lenne elérni az anódot, és az anódáram jelen nem látnánk modulációt (lásd a 2. ábrán szaggatott vonallal jelzett görbe), ilyenkor az anódáram közelítőleg a feszültség $3/2$ -ik hatványával arányos (Schottky-Langmuir-formula).

A 2. ábrán látható egy tipikus mérési görbe higanyt tartalmazó csövön mérve, az anódáramot (I) ábrázolva az U_2 gyorsító feszültség függvényében. Jól látható, hogy az U_2 növelésével az I -ben egyenlő közönként (kb. $4,9 V$ -onként, neon esetén kb. $16,8 eV$ -onként) ugrásszerűen lecsökken az anódáram, és egy lokális minimum elérése után a jelenség megismétlődik. Ezen megfigyelés mutatja, hogy a kb. $5 eV$ kinetikus energiával rendelkező elektronok rugalmatlan ütközések során a higany atomokat diszkrét gerjesztési energiájú szintekre képesek gerjeszteni.



2. ábra. Az anód áram változása az U_2 feszültség függvényében ^{123}C -os higany cső esetén.



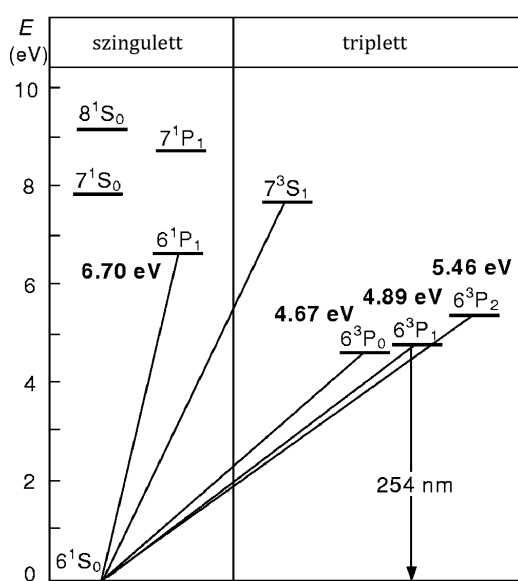
3. ábra. Az anód áram változása az U_2 feszültség függvényében ^{132}C -os higany cső esetén.

A kísérleti görbék alakját sok tényező befolyásolja, mint például az U_1 és U_3 feszültség értékei valamint a csőben található gőz típusa és nyomása, utóbbit a kályha

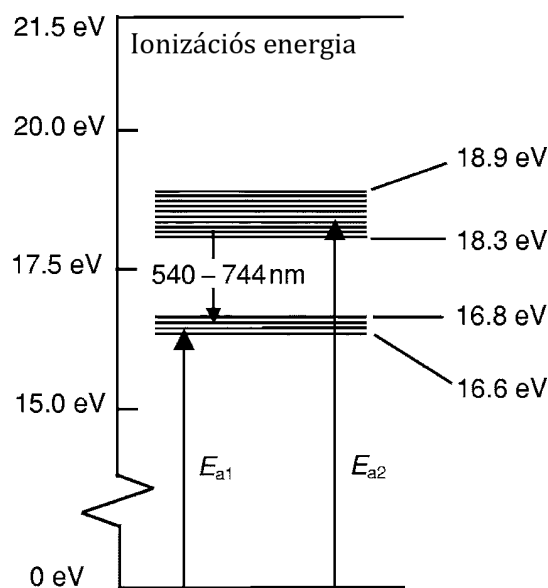
hőmérsékletével szabályozhatjuk, lásd A 2. és 3. ábrák összehasonlításával látható, hogy a hőmérséklet növelése jelentősen csökkenti az anódáramot. Ami azonban változatlan egy adott görbe esetén, az az anódáram ingadozásának periódusa, tehát a minimumhelyek (vagy tetszés szerint a maximumok helyeinek) távolsága.

2.2. A mérés fizikai háttere

A semleges higany atom 80 elektront tartalmaz, amelyek közül 60 teljesen feltölti az alacsonyabb energiaszinteket $n = 4$ -ig, 18 pedig az $n = 5$ és $l = 0, 1, 2$ szinteken található. A maradék kettő elektron az alapállapot $n = 6, l = 0$ szintről gerjeszthető.



4. ábra. A higany legalacsonyabb energiaszintjei [1]



5. ábra. A neon legalacsonyabb energiaszintjei [1]

Amint a higany atom alacsony energiájú ($\approx 5 \text{ eV}$) elektronnal ütközik, az atomon belüli két szabad elektronok közül az egyik fog magasabb szintre gerjesztődni. A legalacsonyabb energia átadással járó folyamat az, amikor a gerjesztett elektron az $n = 6, l = 1$ szintre kerül (ilyenkor a spin ellentétes előjelűvé válik), így a kísérlet során csupán ezt az átmenetet (pontosabban a $6s6s \ ^1S_0 \rightarrow 6s6p \ ^3P_1$ átmenetet) tudjuk megfigyelni (lásd 4. ábra). A közeli 3P_0 átmenet a következő okból kifolyólag nem figyelhető meg: Amint az atom gerjesztett állapotba kerül, az alapállapotba való visszatéréshez foton kibocsátásnak kell történnie. Ez általában egy igen gyors folyamat (10^{-8} s). A foton-kibocsátással járó átmenetek során azonban a teljes impulzusmomentum (J) megmaradásnak teljesülnie kell. A kibocsátott foton impulzusmomentuma 1, tehát az atom teljes impulzusmomentumának is ennyivel kell változnia, $\Delta J = \pm 1$. Eszerint tehát foton-kibocsátással járó átmenet a 3P_1 és 1P_1 állapotokból lehetséges, nem pedig a 3P_0 és 3P_2 metastabil állapotokból (amelyek

csak lassú – 10^{-3} s – folyamatok során történhetnek). A Franck-Hertz kísérletben ezekbe a metastabil állapotokban is gerjesztődhetnek higany atomok, de azután ott is ragadnak (egy milliszekundumig) abban az állapotban, és nem tudnak még több energiát elnyelni. Másrészt viszont amikor a 3P_1 állapot gerjesztődik, akkor az atom gyorsan (0,01 mikroszekundum alatt) visszatér az alapállapotba, és újra képessé válik az elektronnyalábból érkező energia elnyerésére. Az 1P_1 állapot azért nem megfigyelhető, mert a 3P_1 gerjesztése annyira hatékonyan nyeli el az energiát amint a nyaláb elektronjai elérik a 4,9 eV-ot, hogy azok nem tudnak nagyobb (6,7 eV) energiához jutni.

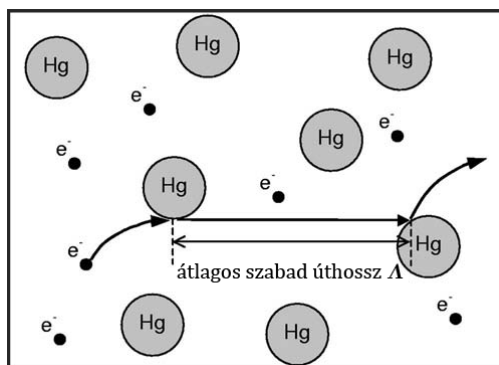
Mivel az energia-átadás egy adott kvantált átmenetre korlátozott, ezért rugalmatlan ütközéseket csak akkor várunk, amikor az elektron legalább az átmenethez szükséges energiával rendelkezik. Amint megtörtént a kölcsönhatás, az elektron újra gyorsulni kezd a külső elektromos tér hatására, és további ütközésekben vehet részt, amíg el nem éri a fékező teret.

2.3. Az elektronok rugalmatlan szóródása

A szórási folyamat legjobban a hatáskeresztmetszettel (σ) jellemezhető, amely a szóró atomok (r_1 és r_2 atomi sugarakkal) effektív keresztmetszete, tehát

$$\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2. \quad (1)$$

Higany atomokon történő elektronszórás esetén a kísérletben gerjesztődő triplet P-szintekhez tartozó hatáskeresztmetszetek összegével (σ_{tot}) számolhatunk, amelyet az egyes folyamatokra számolható értékekből kaphatunk: $\sigma_{tot}(^3P) = 3,5\pi a^2$, ahol $a \equiv$ Bohr sugár.



6. ábra. Az energia átadásának vázlata [1]

Az 6. ábrán látható a higany csőben mozgó elektronok mozgása a két (G_1 és G_2) fémrács közötti térben, U_2 gyorsító feszültség hatására.

A feszültség hatására gyorsuló elektronok a merev gömböknek tekintett higany atomokkal ütköznek. Ha az elektron energiája kisebb, mint a legalacsonyabb gerjesztési szint energiája, az ütközések a részecskék között tisztán rugalmasak, nem

történik energiaátadás. Ha viszont az elektronok energiája meghaladja a gerjesztési energia szintjét, akkor rugalmatlan ütközés után az energiaszintek különbségnek megfelelő energiával gerjeszti a higany atom külső elektronját, amely az energiatöbbletet foton formájában kibocsátja (higany esetén $\lambda \approx 254 \text{ nm}$), miközben visszatér az alapállapotba. Az ütközéseket megelőzően az elektron által megtett átlagos út az ún. *átlagos szabad úthossz* (Λ). Az elektronok Λ út megtétele során gyűjtik mozgási energiájukat, amellyel az ütközésekkor rendelkeznek.

Az atomok ilyenfajta rendszerére, amelyben a részecskék csupán ütközések során hatnak kölcsön egymással, az ideális gáztörvény alkalmazható:

$$p = nk_B T, \quad (2)$$

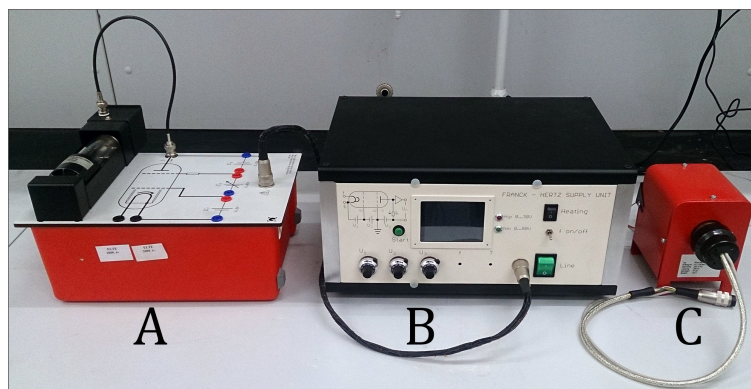
ahol n a részecskesűrűség, k_B a Boltzmann-állandó, T pedig a rendszer hőmérséklete. Egy olyan nyaláb esetén, ahol N_0 számú részecske halad keresztül egy gázon,

$$N = N_0 e^{-n\sigma x} \quad (3)$$

számú fog szóródni x távolságon. A definíció szerint és a (3) egyenletet felhasználva a szabad úthossz értékére így a következőt kapjuk:

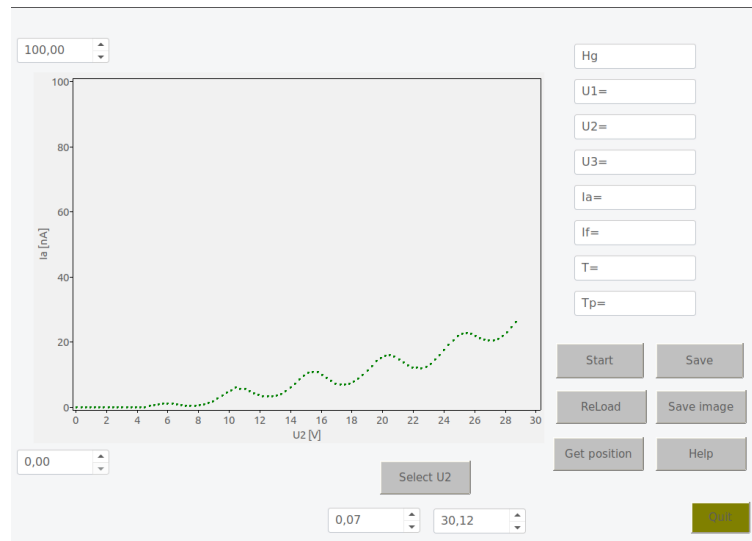
$$\Lambda \equiv \frac{1}{N_0} \int_0^\infty x \cdot \left| \frac{dN}{dx} \right| dx = n\sigma \cdot \int_0^\infty x e^{-n\sigma x} dx = \frac{1}{n\sigma}. \quad (4)$$

3. Mérési összeállítás



7. ábra. A mérési összeállítás

A 7. ábrán látható a mérési összeállításról készült kép. Ennek három fő része van: **A** a neonsövet magába foglaló ház, valamint a cső sematikus rajza; **B** a Franck-Hertz tápegység, amelyen potméterek segítségével az U_1 , U_2 és U_3 feszültségek egyenként állíthatóak, valamint a kályha és az anód fűtése kapcsolható; **C** pedig a higany csövet tartalmazó kályha. Az összeállítás része még egy számítógép, amely



8. ábra. A mérőprogram

a tápegységtől kapja az adatokat, és a kezdeti paraméterek beállítása után automatikusan fel is veszi a gyorsító feszültség – anódáram görbéket. A mérést adatfájlként és képként is ki lehet exportálni.

A mérőprogram egy terminálból a *frack_hertz* utasítással, vagy az asztalon található ikonnal indítható el. Elindítás után először ki kell választani azt a könyvtárat ahova a mérések el szeretnénk tenni. Célszerű a neptun kóddunkal egy önálló könyvtárat a „measures” könyvtáron belül létrehozni. Ezután a 8. ábrán látható kép jelenik meg.

A mérőprogram folyamatos kijelzi az összes mérési adatot. Az is látszik, hogy melyik cső van éppen csatlakoztatva. A „Start” gomb benyomásával elindul az U_2 szerinti szkennelés és az adatok megjelennek a grafikonon. A grafikon skáláját a tengelyek melletti boxokban lehet megadni a kívánt szám beírásával és egy „enter” leütésével ill. az egérrel a nyilakra kattintva. Az U_2 tengelyt a „Select U2” gombbal is kiválaszthatjuk. Ennek benyomása után megjelenik két függőleges vonal amelyeket az egérrel rákattintva mozgathatunk. Amikor elértük a kívánt pozíciókat ismét rákattintva a gombra a skála kiválasztódik.

A „Get position” gomb segít a minimumok megkeresésében. A gombra kattintva egy függőleges vonal jelenik meg amelyet ugyanúgy mint a skála kiválasztásánál mozgatni tudunk. A mozgatás közben kijelződik a vonal pozíciójának megfelelő U_2 érték.

A mérés befejezése után az eredmények a „Save” gomb benyomásával menthetők el. A „Reload” gombbal egy korábban elmentett mérés visszaolvasható, így újra kiértékelhető.

A „Save Image” gomb segítségével az aktuális grafikont jpg formátumban el tudjuk menteni. A file neve az aktuális dátumból áll.

4. A mérés menete

- A tápegység bekapcsolása előtt két dolgot fontos ellenőrizni: az anód és a kályha fűtése ("f on/off" és "Heating") kikapcsolt állapotban legyen!
- A mérés során két csövet fogunk vizsgálni (**Ne** és **Hg**) Csatlakoztassuk az egyik csőhöz tartozó kábelt a tápegységhez! Miután megbizonyosodtunk arról hogy minden kapcsoló a megfelelő állásban van, a tápegység bekapcsolása után figyeljük meg, hogy az összeállítás automatikusan felismeri a hozzá csatlakoztatott csövet (piros vagy zöld jelzőfény kigyulladás). A jelzőfény egyben a csőre kapcsolható gyorsító feszültség intervallumot is megmutatja. Indítsuk el a számítógépen az adatgyűjtő programot, amely átveszi a tápegységtől a rendszer adatait, és kijelzi azokat.
- A higanyt tartalmazó cső hideg állapotában kiemelhető a kályhából, ám ezzel igen körültekintően kell bánni, ugyanis a cső törékeny, elég egy figyelmetlen mozdulat, és könnyen kiránthatjuk a helyéről.
- Mielőtt bekapcsolnánk az anód fűtését, szükséges lehet a cső előfűtése. Higanyos cső esetén ez különösen fontos, hiszen a higany képes az elektródákon is kondenzálódni, amelyet el kell párologtatni a fűtés megkezdése előtt, ellenkező esetben rövidzárlat keletkezhet és tönkremehet a cső. Egy ilyen komponens beszerzése igen drága, ezért alapos körültekintéssel kezeljük a rendszert! Neon esetén nem alkalmazunk fűtést.
- A hőmérséklet mérésére behelyezett érzékelő nem feltétlenül a cső hőmérsékletét mutatja, hiszen egy kis időre van szükség, amíg a cső is felveszi a körülötte kialakuló hőmérsékletet. A túlmelegedést elkerülendő először állítsuk $T = 100^\circ C$ -ra a célhőmérsékletet. Amikor ez beállt (kb. 15 perc) lassan emeljük a hőmérsékletet $T = 130^\circ C$ -ra. A kályha burkolata működés közben felforrósodik, így kerüljük a fémház érintését!
- Állítsuk be a potméterek segítségével a tápegységen a kíván feszültség értékeket (beállítás után várjunk 1 percet, mert a katód fűtőszála lassan reagál a feszültség változásaira): **Ne** esetén $T =$ szobahőmérséklet, $U_1 = (1, 4-2, 0) V$, $U_3 = (7, 4-8, 2) V$; **Hg** esetén $T = 130^\circ C$, $U_1 = (6, 8-8, 0) V$, $U_3 = (1, 1-1.9) V$. U_2 gyorsító feszültséget a vezérlés a mérés elindítását követően egyenletesen változtatja, miközben a mért I anódaáram értékei is rögzítésre kerülnek. Amint a program elérte az U_2 maximális értékét, a mérés befejeződik, az adatokat pedig el kell menteni.
- Az adatok pendrive-on is elvihetők, vagy e-mailen keresztül továbbíthatóak a számítógépről. A mérés befejeztével először az anód és a kályha fűtését kapcsoljuk le, majd a tápegységet is állítsuk le.

5. Feladatok

- Mérje meg és ábrázolja az első gerjesztési potenciált többfajta U_1 és U_3 feszültség értéken a neonos cső esetében, szobahőmérsékleten! A különböző beállítások esetében mindig egyszerre csak egy paraméterben térjen el az ideális értékektől!

– **Ne** esetén:

- * $U_1^{Ne} = (1,4 - 2,0) V$ között $0,3 V$ -onként,
- * $U_3^{Ne} = (7,4 - 8,2) V$ között $0,4 V$ -onként mérve.

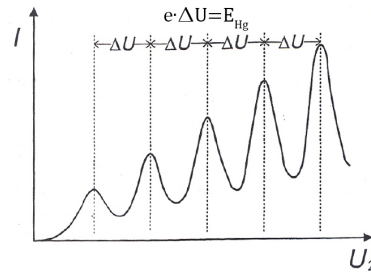
Milyen hatással van U_1 és U_3 változása a görbék alakjára?

- Végezze el az előző feladatot a higanyos cső esetében is, a kijelölt hőmérsékleten ($T = 178^\circ C$)!

– **Hg** esetén :

- * $U_1^{Hg} = (6,8 - 8,0) V$ között $0,6 V$ -onként,
- * $U_3^{Hg} = (1,1 - 1,9) V$ között $0,4 V$ -onként mérve.

- Határozza meg a maximumok (vagy a minimumok) távolságaiból (9. ábra) az első gerjesztési energia (E_{Hg} és E_{Ne}) átlagos értékét és annak hibáját!
- Határozza meg, hogy milyen hullámhosszú foton keletkezik a gerjesztett elektron visszaugrásakor az előző feladatban számolt E_{Hg} és E_{Ne} értékek segítségével. Adja meg az értékek hibáját! Az eredményt vesse össze az irodalmi értékkel!
- Számítsa ki az elektronok szabad úthosszát σ_{tot} és a (4) egyenlet alkalmazásával higany esetében! A csőben kialakuló nyomás számításához használhatjuk a $p = 8,7 \cdot 10^{(9-(3110/T))}$ összefüggést [1], amely közelítőleg igaz a $T = (300 - 500) K$ skálán, és $p [Pa]$ -egységekben, T pedig $[K]$ egységekben értendő.



9. ábra. ΔU meghatározása

6. Ellenőrző kérdések

1. Miért volt annyira fontos az 1914-es kísérlet, amiért azt később Nobel-díjjal jutalmazták?
2. Hogyan épül fel a Franck-Hertz cső?
3. Mi az elektron szabad úthossza?
4. Miért szükséges a fékező potenciál jelenléte a Franck-Hertz effektus megfigyelésében?
5. Hova kerülnek azok az elektronok, amelyek nem érik el az anódot?
6. Mi történik azzal az energiával, amelyet az elektronok a higany atomokkal történt ütközéskor elveszítenek?
7. Miért csak a 3P_1 átmenetet figyelhetjük meg a higany mérésekor?
8. Hogyan és miért módosítja a kísérleti görbe alakját a következő paraméterek változtatása: T növelése, U_1 növelése, $U_3 = 0$?
9. Miért nem ajánlott túl alacsony, ill. túl magas hőmérsékletű kályhával mérni?
10. Miért nem tudjuk a neonos csőben a koncentrációt melegítéssel változtatni?

7. Irodalomjegyzék

1. G. Rapior, K. Sengstock és V. Baev, *New features of the Franck-Hertz experiment*. Am. J. Phys. 74 (5), May 2006. DOI: 10.1119/1.2174033
2. P.H. Heckmann és E. Traebert, *Einführung in die Spektroskopie der Atomhülle*. Vieweg, 1980.
3. B. Joachimi és B. Klobes, *Report on Franck-Hertz experiment*. 2005.
4. S.D. Morrison, *The Franck-Hertz experiment: Inelastic Collisions in Mercury Gas*. 2008.