

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích

Fakulta přírodovědecká

Ústav fyziky a biofyziky



FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM IV

Franckův - Hertzův experiment

Vypracoval: Milan Somora

České Budějovice 7. 12. 2017

Zadání

1. Změřte voltampérovou charakteristiku triody plněné rtuťovými parami
2. Odečtěte hodnoty napětí lokálních minim křivky
3. Určete energii přechodu v atomu rtuti
4. Porovnejte výslednou energii s energií fotonu o vlnové délce 254 nm

Použité přístroje a pomůcky

Rtuť plněná lampa (e.č. 56), měřicí přístroj 3B NET log (s.č. 5465111), pec (ev.č. 6221), ovládací jednotka (ev.č. 552), vodiče, počítač s programem 3B-NETlab.

Teoretický úvod

Jedná se o experiment uskutečněný J. Franckem a G. Hertzem. Experiment dokazuje, že energetické hladiny atomů jsou kvantovány. Dva základní Bohrovy postuláty lze vyložit takto:

1. Atomy mohou setrvávat delší dobu ve stacionárních stavech, ve kterých nevyzařují ani nepohlcují energii. Dojde-li ke změně energie vyzářením nebo pohlcením energie, „přeskočí“ atom z jednoho stacionárního stavu do druhého.
2. Při přechodu z jednoho stacionárního stavu do druhého vydávají nebo pohlcují atomy monochromatické záření jen o určité frekvenci

$$E = h\nu = E_2 - E_1, \quad (1)$$

kde h je Planckova konstanta.

Princip Franckova - Hertzova pokusu

Atomy zředěného plynu jsou bombardovány elektrony. Tyto srážky mohou být buď pružné nebo nepružné. Dojde-li k pružné srážce, elektron se od atomu odrazí, jeho energie se nemění a dojde pouze ke změně jeho směru rychlosti. Naopak při nepružné srážce

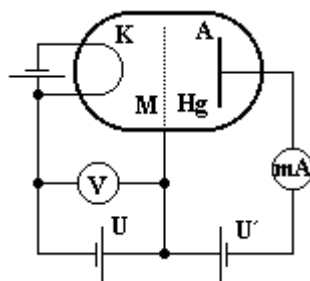
1. elektron se s atomem srazí, předá mu svoji energii a změní se i směr a velikost jeho rychlosti.

2. Atom přejde do jiného stacionárního stavu (zvýší se mu hladina energie)

Atom tedy buď energii nepřijímá nebo přijímá, a to v diskrétních kvantech, které odpovídají rovnici (1). Tato energie je závislá na urychlujícím potenciálu. Atomy nejsilněji pohlcují energii elektronů při tzv. *kritickém potenciálu*. Franckovy - Hertzovy pokusy tuto teorii plně potvrdily.

Ve svých experimentech použili elektronku naplněnou rtuťovými parami (obr. 1). Rozžhavená katoda emituje elektrony, které jsou urychlovány potenciálem mezi katodou K a mřížkou M. Po dosažení mřížky elektrony získají kinetickou energii

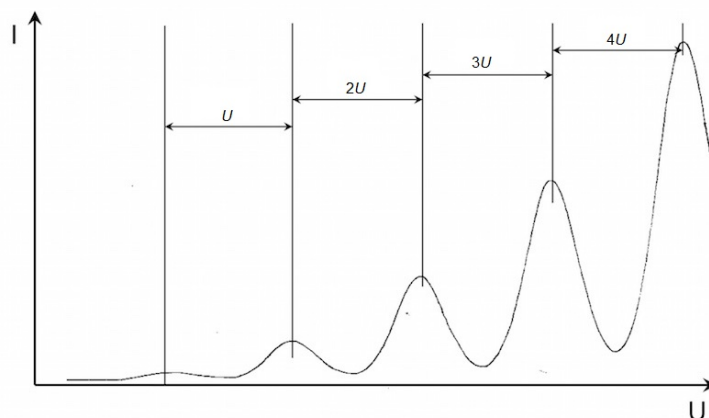
$$E_k = E = eU = \frac{1}{2}mv^2. \quad (2)$$



Obrázek 1: Zapojení Franckova - Hertzova experimentu

Urychlené elektrony dále prolétnou skrze mřížku do prostoru, kde je pole opačně orientováno (anoda má záporné napětí). Pokud jsou srážky mezi elektrony a atomy pružné, získají elektrony dostatečnou energii na to, aby překonaly elektrické protipole a dostaly se až k anodě. To se projeví vzrůstem anodového proudu a napětí na mřížce, který představuje první maximum na grafu závislosti mezi anodovým proudem na napětím na mřížce (obr. 2). Jakmile dojde při napětí určitém napětí k nepružným srážkám, ztratí elektrony před mřížkou svou energii a na anodu nedolétnou. To způsobí pokles proudu a napětí, který představuje minimum na grafu. Napětí pro první minimum je $U = E/e$.

Jestliže napětí mezi katodou a mřížkou dále vzrůstá, začnou se atomy a elektrony pružně srážet blíže ke katodě, protože potřebnou kinetickou energii získají na kratší dráze. To se projeví druhým proudovým maximem na grafu. Zvětšíme-li napětí na hodnotu $2U = E/e$, opět dojde k nepružným srážkám a tím k druhému minimu, a tak dále. Změny anodového proudu (nebo napětí na mřížce) tedy slouží jako ukazatel pružných a nepružných srážek.



Obrázek 2: Minima a maxima na Franckově - Hertzově křivce

Po nepružné srážce atomy rtuti zůstávají v excitovaném stavu řádově 10^{-7} s a pak se vrací do základního stavu. Při tomto přechodu vysílají fotony o vlnové délce 254 nm.

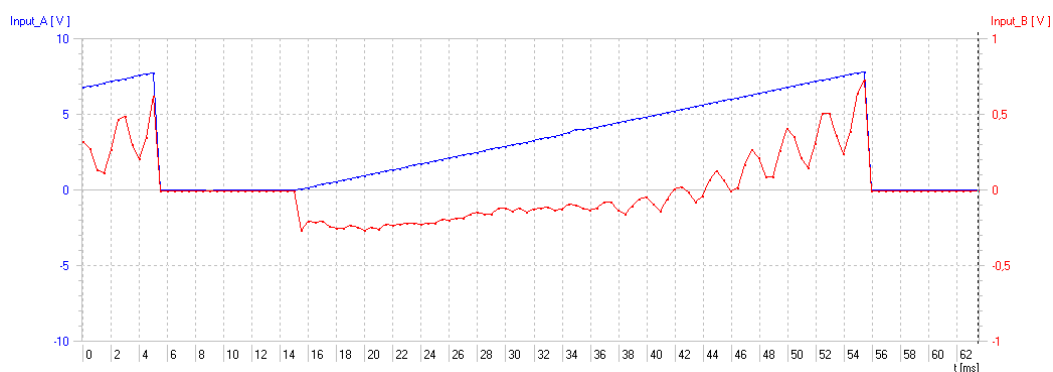
Postup měření

1. Zapojil jsem pokus podle obrázku 1.
2. Měřicí přístroj 3B NET log jsem zapojil pomocí USB kabelu k počítači PC.
3. Zapnul jsem pec a nastavil jsem teplotu na 210°C .
4. Jakmile pec dosáhla teploty 210°C , nechal jsem lampu asi 10 minut prohřát.
5. Zapnul jsem 3B NETlog a spustil jsem program 3B-NETlab a nastavil jsem jej podle tabulky 1.
6. Na ovládací jednotce jsem nastavil žhavicí napětí 6-7 V (Filament)
7. Pomalu jsem zvyšoval urychlující napětí na hodnotu 20 V.
8. Na obrazovce se mi zobrazily dvě křivky (urychlující napětí a anodový proud). Pomocí triggeru na ovládací jednotce jsem nastavil křivky tak, aby se celé nacházely v okně osciloskopu.
9. Zvyšoval jsem urychlovací napětí až na 80 V.

10. Pomocí brzdícího napětí (Revers Bias) a žhavicího napětí a koeficientu V na ovládací jednotce jsem upravil Franckovu - Hertzovu křivku tak, aby měla co nejlépe rozeznatelná maxima a minima (obrázek 3).
11. Vyexportoval jsem data z 3B-NETlabu do Excelu, z nich určil energii přechodu v atomu rtuti a porovnal jsem výslednou energii s energií fotonu o vlnové délce 254 nm.

Položka	Podpoložka	Parametr/Hodnota
Input A	Input Mode	VDC
	Input Range	20 V
Input B	Input Mode	VDC
	Input Range	20 V
Trigger	A	6%
Osciloskop	Sampling	500 μ s

Tabulka 1: Nastavení programu 3B-NET lab



Obrázek 3: Maxima a minima na Franckově - Hertzově křivce

Vypracování

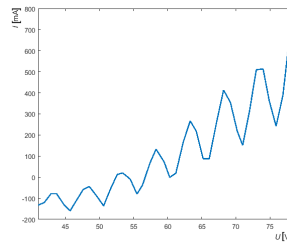
Při experimentu jsem měřil průběh anodového proudu v závislosti na urychlujícím mřížkovém napětí (převodní charakteristiku).

Z naměřených dat v 3B-NETlabu (příloha A) jsem vytvořil graf, který zobrazuje minima a maxima na Franckově - Hertzově křivce (obr. 4). V programu MATLAB jsem pomocí mřížky odečetl hodnoty napětí (obr. 5), které odpovídají maximům na křivce (tab. 2) a z nich vypočítal napět'ové rozdíly

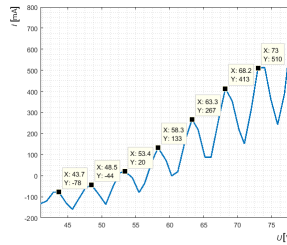
$$\Delta U_i = U_{i+1} - U_i,$$

kteřé odpovídají minimům na křivce - tedy napětovým skokům, jak moc atomy energii z elektronů absorbují (tab. 3). Z těchto rozdílů jsem nakonec spočítal aritmetický průměr a tím získal první kritický potenciál U , při kterém atomy energii pohlcují nevíce, tedy

$$\overline{\Delta U} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \Delta U_i \doteq 4.88 \text{ V}.$$



Obrázek 4: Maxima a minima na Franckově - Hertzově křivce



Obrázek 5: Franckova - Hertzova křivka: odečet napětí pomocí mřížky

U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
43.7 V	48.5 V	53.4 V	58.3 V	63.3 V	68.2 V	73.0 V

Tabulka 2: Hodnoty napětí na Franckově - Hertzově křivce

ΔU_1	ΔU_2	ΔU_3	ΔU_4	ΔU_5	ΔU_6
4.8 V	4.9 V	4.9 V	5.0 V	4.9 V	4.8 V

Tabulka 3: Rozdíly napětí mezi na Franckově - Hertzově křivce

Chyba měření

Chyba aritmetického průměru

$$\sigma_{\Delta U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (\Delta U_i - \overline{\Delta U})^2}{6(6-1)}} \doteq 0.03 \text{ V}$$

Chyba odečítání ze stupnice

Hodnoty urychlovacího napětí jsem odečítal z mřížky na obrázku 5. Předpokládal jsem tedy, že skutečná hodnota leží s nejvyšší pravděpodobností v intervalu $\pm 1/2$ dílku. Jako směrodatnou chybu mřížky jsem uvažoval $1/\sqrt{3} \cdot 1/2 = 0.288... \approx 0,3$ dílku. Nejmenší dílek na stupnici urychlovacího napětí je 0.2 V, směrodatná chyba tedy je

$$\sigma_o = 0.2 \text{ V} \cdot 0.3 = 0.06 \text{ V}.$$

Sloučení chyb

$$\delta_{\Delta U} = \sqrt{(\sigma_{\Delta U})^2 + (\sigma_o)^2} \doteq 0.07 \text{ V}.$$

Jelikož jsem stanovil chybu pouze ze šesti hodnot, je nutné chybu ještě vynásobit koeficientem $k_A = 1.3$, tj.

$$\delta_{\Delta U} = k_A \cdot \delta_{\Delta U} = 1.3 \cdot 0.07 \text{ V} \doteq 0.09 \text{ V}.$$

Absolutní chyba je $\delta_{\Delta U} = 0.09 \text{ V}$. To znamená, že pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty kritického potenciálu U leží v intervalu $(\overline{\Delta U} - \delta_{\Delta U}, \overline{\Delta U} + \delta_{\Delta U})$.

První kritický potenciál je tedy

$$U = (4.88 \pm 0.09) \text{ V}.$$

Excitační energie atomu rtuti

Kinetická energie, která uvede atom rtuti při nepružné srážce s elektronem do excitovaného stavu je dle [2] 4.9 eV. Budu-li vycházet ze vztahu (2), v mém experimentu elektron získal kinetickou energii

$$E_e = eU \pm e\delta_{\Delta U} = e(U \pm \delta_{\Delta U}) = (4.88 \pm 0.09) \text{ eV}. \quad (3)$$

Porovnání energie elektronu s vyzářeným fotonem

Po nepružné srážce atomy rtuti zůstávají v excitovaném stavu řádově 10^{-7} s a pak se vracejí do základního stavu. Při tomto přechodu vysílají fotony o vlnové délce 254 nm.

Energie fotonu je dána vztahem [1]

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \doteq 4,9 \text{ eV},$$

kde h je Planckova konstanta a c je rychlost světla. Poměr mezi energií fotonu a elektronu je¹

$$k = \frac{E_f}{E_e} = \frac{4.9 \text{ eV}}{4.9 \text{ eV}} = 1 \Rightarrow E_f = E_e. \quad (4)$$

Z rovnice (4) vyplývá, že atom rtuti při přechodu z vyšší energetické hladiny do základního stavu vyzáří stejnou energii, kterou získal při nepružné srážce od elektronu.

¹pro E_f jsem použil hodnotu z MFCHT [1] a E_e jsem zaokrouhlil na 4.9 eV

Diskuse

Mým experimentem jsem potvrdil skutečnost, kterou objevili Franck s Hertzem již v roce 1914, a sice že v elektronových obalech atomů existují kvantované energetické hladiny.

Dle [2] musí mít elektron energii 4.9 eV, aby atom rtuti po srážce vyzářil foton o vlnové délce 254 nm. Měřením se mi podařilo odhadnout hodnotu energie v intervalu (4.88 ± 0.09) eV, což by odpovídalo hodnotě v MFCHT [2].

Poměrem energií mezi vyzářeným fotonem a urychleným elektronem jsem zjistil, že atom rtuti při přechodu z vyšší energetické hladiny do základního stavu vyzáří stejnou energii ve formě fotonu, kterou získal při nepružné srážce od urychleného elektronu.

Hodnota kritického potenciálu $U = (4.88 \pm 0.09)$ V ve spojitosti s grafem na obrázku 5 rovněž potvrzuje, že se jedná o násobky celých čísel, jak je naznačeno za obrázku 2.

Závěr

Energie přechodu v atomu rtuti je (4.88 ± 0.09) eV. Energie urychleného elektronu, který uvede atom do excitovaného stavu je stejná, jako energie fotonu o vlnové délce 254 nm, kterou vyzáří atom rtuti po srážce s urychleným elektronem, tedy rovněž (4.88 ± 0.09) eV.

Literatura

- [1] ŠPATENKA, P., KALČÍK, J. (1979): *Fyzikální praktikum IV. Atomová a jaderná fyzika*. Pedagogická fakulta jihočeské univerzity, České Budějovice, 129 s, ISBN 80-7040-014-5.
- [2] MIKULČÁK J., KLIMEŠ, B. a kolektiv. (1989): *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Státní pedagogické nakladatelství, Praha, 206 s., ISBN 54-09-12/1b.

Příloha A

Hodnoty z 3B-NETlabu byly použity v MATLABu jako vektory:

Napětí $U = [\text{V}]$

u=[41.0 41.9 42.9 43.7 44.8 45.7 46.7 47.6 48.5 49.6 50.6 51.6 52.6 53.4 54.5
55.5 56.3 57.4 58.3 59.5 60.3 61.2 62.3 63.3 64.2 65.2 66.1 67.2 68.2 69.2 70.2
71.0 72.0 73.0 74.0 74.9 75.9 76.9 77.8 78.6];

Proud $I = [\text{mA}]$

i=[-133 -120 -78 -78 -131 -159 -106 -59 -44 -90 -136 -57 13 20 -9 -80 -38 67 133
71 -1 19 168 267 218 88 88 265 413 355 219 151 313 510 513 362 242 388 642
732];