

Úloha 1

Franckův-Hertzův pokus a stanovení excitační energie atomu rtuti

1.1 Úkol měření

1. Změřte závislost anodového proudu I_A na napětí U_G speciální elektronky ve Franckově-Hertzově pokusu při vybrané teplotě z intervalu 160-250 °C. Závislost znázorněte graficky.
2. Nalezněte všechna měřitelná minima této závislosti při dalších dvou teplotách z uvedeného intervalu. Při volbě teplot dbejte na podmínky obsažené v kapitole „Postup měření“.
3. Z naměřených hodnot stanovte excitační energii atomu rtuti a příslušnou vlnovou délku emitovaného světla.

1.2 Obecná část

1.2.1 Excitace atomů

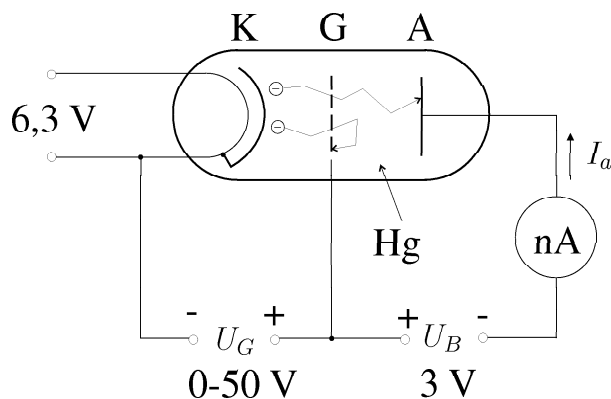
Excitovaný stav atomu je stav s vyšší energií než stav základní, a proto je nutné pro excitaci dodat atomu energii. Rozeznáváme několik typů excitace.

Prvním typem je excitace je excitace absorpcí světla, tj. fotonu. Jinými slovy se této excitaci říká *rezonanční fluorescence*, neboť v elektromagnetické záření vnějším a působícím na atom musí být přítomny fotony s frekvencemi takovými, jaké odpovídají Bohrově podmínce pro vyzáření a pohlcení fotonů.

Dalším typem excitace je excitace nárazem. V plameni nebo jinak zahřátém plynném prostředí dosahují některé atomy dostatečně vysokých kinetických energií k tomu, aby při nepružných srážkách excitovaly své sousedy.

Třetí typ excitace má původ ve srážce elektronů s atomy. energii, která je k tomu zapotřebí, získávají elektrony různými způsoby, např. v elektrickém oblouku, v jiskře, ve výboji, uvolněním ze žhavé katody apod.

Posledním typem excitace, který zde uvedeme, je ionizační proces. Absorpce fotonu nebo srážka atomu s nabitou částicí může vyvolat ionizaci. Pokud je v blízkosti vzniklého



Obrázek 1.1: Uspořádání Franckova-Hertzova pokusu.

iontu elektron, je zachycen na hladině o vysoké energii a z ní přeskakuje až do neobsazeného stavu s vyzařováním fotonů.

1.2.2 Franckův-Hertzův pokus

Formulace Bohrových kvantových postulátů našla největší přímé experimentální potvrzení v pokusech J. Francka a G. Hertze, která byla uskutečněna v Berlínském ústavu fyzikální chemie v letech 1913-14¹. Myšlenka jejich pokusů spočívá v tom, že atomy nebo molekuly více méně zředěného plynu jsou odstřelovány pomalými elektrony. Při tomto odstřelování pozorujeme rozložení rychlostí elektronů před srážkou a po ní. Jde-li o pružnou srážku, pak rozdělení rychlostí se při srážce nemění a naopak při nepružné srážce ztrácí část elektronů svou energii, kterou předávají atomům, se kterými se srazily, a rozdělení rychlostí se mění.

Než přejdeme k podrobnějšímu popisu těchto pokusů a jejich výsledků, vyšetříme některé otázky, související s provedením těchto experimentů. Experimentální zařízení, určené pro výzkum srážek pomalých elektronů s atomy, musí vyhovovat těmto základním požadavkům:

1. Zdroj elektronů musí dávat dostatečně velké množství pomalých elektronů s určitým počátečním rozdělením rychlostí.
2. Těmto elektronům lze dodat, předem známou rychlost působením vnějšího urychlujícího potenciálu.
3. Urychlené elektrony se musí srazit se zkoumanými atomy nebo molekulami v určitém místě aparatury.

Uspořádání experimentální sestavy je zachyceno na obr. 1.1. Z obrázku je patré, že k vlastní interakci mezi elektronem a atomy dochází v elektronkové triodě. Trioda je naplněna zředěnými parami rtuti (Hg). Žhavená katoda K uvolňuje termoemisí elektrony, které jsou urychleny v prostoru mezi katodou a kladně nabitou mřížkou G a vstupují do experimentálního prostoru. V tomto prostoru se nachází další elektroda A (anoda). Mezi mřížkou a anodou (sběrnou elektrodou) se udržuje malý potenciálový rozdíl U_B , takže k proudu

¹Za tyto práce a za objev zákonů, působících při interakci elektronu s atomem jim byla v roce 1925 udělena Nobelova cena.

I_a , jenž prochází ampérmetrem, přispívají jen elektrony s energií vyšší než jisté minimum energie. Se zvyšováním urychlovacího potenciálu U_G dopadá na destičku stále větší počet elektronů a tudíž proud I_a roste. Rychlost v , kterou získává nepohybující se elektron vlivem urychlujícího potenciálu U_G dostaneme ze vztahu²

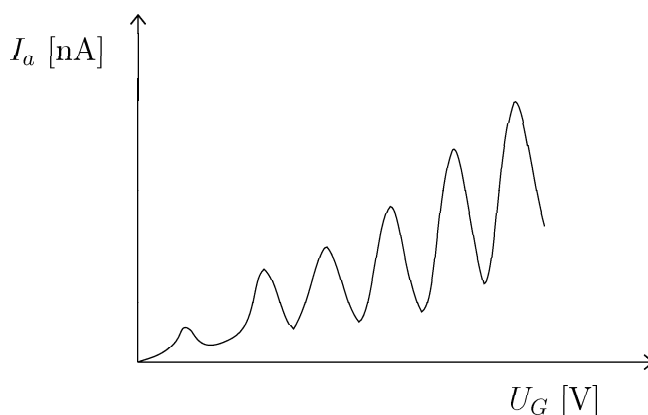
$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_G, \quad (1.1)$$

tj.

$$v = \sqrt{\frac{2eU_G}{m}} \simeq 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U_G} \text{ [m/s]}, \quad (1.2)$$

kde m je hmotnost elektronu a e je jeho měrný náboj.

Protože elektron je výrazně lehčí než atom rtuti, můžeme jejich srážku považovat za pružnou, tj. elektron téměř neztrácí při srážce svoji kinetickou energii, pouze odskakuje ve směru odlišném od původního. Po dosažení určité kritické energie elektronů však anodový proud I_a náhle klesá. Tento jev se vysvětluje tím, že elektron během srážky s jedním z atomů pozbyde částečně nebo úplně svou kinetickou energii excitací atomu rtuti na energetickou hladinu nad jeho základní stav. Taková srážka se nazývá nepružná. Kritická energie elektronů odpovídá excitační energii atomu rtuti. Některé elektrony mají po nepružné srážce dostatečnou energii k tomu, aby dosáhly anody A bez zřetele na kladně nabitou mřížku G. Z tohoto důvodu anodový proud I_a neklesne na nulu. Při dalším zvyšování U_G proud I_a roste a další významný pokles nastane pro případ, kdy elektrony mají energii odpovídající další excitační energii pro vyšší energetickou hladinu. Při dalším zvyšování urychlujícího napětí budeme pozorovat podobný vývoj nárůstu a poklesu anodového proudu se stejným zdůvodněním. Charakteristický průběh závislosti anodového proudu I_a na urychlujícím napětí U_G je zachycen na obrázku 1.2. Z obrázku jsou



Obrázek 1.2: Výsledky Franckova-Hertzova pokusu.

patrná ekvidistantní maxima a minima. Mezi minimy i mezi maximy jsou vzdálenosti odpovídající 4,9 V (pro atomy rtuti). Avšak je nutné zde upozornit na skutečnost, že první maximum má hodnotu o něco nižší než je hodnota 4,9 V, která odpovídá hodnotě umožňující elektronu získat energii k excitaci atomu rtuti na první energetickou hladinu nad jeho základní stav. Tato skutečnost se dá vysvětlit tím, že se k vnějšímu urychlujícímu

²Ze vztahu (1.2) je patrné, že např. pro $U_G = 1$ V je rychlost elektronu vysoká, avšak vzhledem k rychlosti světla $c \simeq 3 \cdot 10^8$ m/s se jedná o rychlost relativně malou, tj. jedná se o pomalý elektron.

napětí U_G přičítá kontaktní rozdíl potenciálů, který jako by posouval celou křivku vlevo (avšak vzdálenost mezi maximy se nemění a zůstává 4,9 V).

K doplnění představy o pohybu elektronů v elektronce je nutné zdůraznit, že ať je při první nepružné srážce energie elektronů jakákoliv, dosáhnou všechny destičky (elektrody) A se stejnou energií. Pro větší jasnost si představme, že potenciál katody je roven nule, potenciál anody A se rovná $+\varphi_A$, kritický potenciál, kdy nastane nepružná srážka, je φ_k (4,9 V) a dále předpokládejme, že mřížka je odstraněna. Spád potenciálu φ_A je po celé délce od K do A. Nechť elektron prodělá nepružnou srážku v místě, kde je potenciál roven φ_x . Dospěje-li k tomuto místu, získá energii $e\varphi_x$ a při nepružné srážce předá energii $e\varphi_k$. Tedy po srážce bude mít energii $e(\varphi_x - \varphi_k)$. Rozdíl potenciálů na zbývajících dráze k elektrodě A bude $\varphi_A - \varphi_x$; na této cestě elektron ještě získá energii $e(\varphi_A - \varphi_x)$, a tedy dosáhne-li elektrody A, bude mít energii

$$e(\varphi_x - \varphi_k) + e(\varphi_A - \varphi_x) = e(\varphi_A - \varphi_k). \quad (1.3)$$

Jak vidíme, tato energie nezávisí vůbec na místě první nepružné srážky.

V souladu s Bohrovou teorií, elektrony urychlené potenciálním rozdílem 4,9 V odevzdají v nepružné srážce všechnu svoji energii a atom se takto dostává do vyššího energetického stavu. Jeho přechod do základního stavu je spojený s vyzářením fotonu přesně určité frekvence ν (jí odpovídá vlnová délka³ $\lambda = 253,6$ nm, pro kterou platí, že $\nu h = 4,9$ eV, kde h je Planckova konstanta.

1.2.3 Technické prostředky experimentu

Podmínky v elektronce

Pro vyvolání popsaných efektů musí být v elektronce dosaženo potřebné hustoty (resp. tlaku) rtuťových par. Při pokojové teplotě je tato hustota příliš nízká a většina obsahu rtuti se nachází v kapalném stavu. Proto je nutno elektronku zahřívat a udržovat na vyšší teplotě. Vhodná teplota leží přibližně mezi 160-250 °C.

Elektronka je umístěna v kovové pídce spolu s topným tělesem a čidlem teploty. Vytápění a stabilizaci teploty zajišťuje mikroprocesorový regulátor.

POZOR! NEDOTÝKEJTE SE ZAHŘÁTÉ PÍCKY - NEBEZPEČÍ POPÁLENÍ!

Regulátor topení

Horní (červený) displej regulátoru zobrazuje skutečnou teplotu uvnitř pídky, dolní (zelený) displej pak teplotu požadovanou. Požadovanou teplotu lze nastavit tlačítky \uparrow , \downarrow v rozsahu 150 až 260 °C. Ostatní tlačítka jsou nefunkční.

Vlastní topení s regulací začne až po zapnutí červeného prosvětleného vypínače „TOPENÍ“. Kontrolka ve vypínači a LED dioda LD 1 regulátoru svítí v okamžicích, kdy regulátor zapíná topné těleso.

Měření anodového proudu

Hodnoty anodového proudu v experimentu se pohybují v rozsahu cca 0,1 - 100 nA v závislosti na teplotě elektronky. K jejich měření je tedy potřebný dostatečně citlivý nanoampérmetr. Ten je součástí zvláštního přípravku spolu se zdrojem urychlovacího napětí.

³Mezi vlnovou délkou, rychlostí světla a jeho frekvencí ν platí následující vztah: $\lambda = c/\nu$.

Zdroj proměnného urychlovacího napětí

Umožňuje jemné nastavení napětí v rozsahu 0 až cca 50 V pomocí desetiotáčkového (!POZOR, NEPŘEKROUTIT!) potenciometru. Dlouhodobá časová stabilita napětí je zajištěna elektronickým stabilizátorem. Velikost napětí je měřena externím voltmetrem, připojeným do zdírek přípravku.

Výboj a jeho zhášení

Při nižších teplotách elektronky (cca 160-220 °C) stačí nastavitelné urychlovací napětí k dosažení kritického stavu, v němž dojde v důsledku nižšího tlaku rtuťových par a s tím související delší střední volné dráhy elektronů k lavinovité ionizaci charakterizované zapálením výboje. Výboj je zřetelně viditelný okénkem v pícce. Výboj tvoří praktický zkrat a proud v obvodu $G-K$ jakož i I_A vzroste na hodnotu omezenou vnějšími ochrannými odpory vestavěnými v přívodech elektronky, tedy do řádu několika mA. Za této situace je nanoampérmetr přetížen asi o 6 řádů, ale jeho obvody jsou vybaveny ochranami, takže může tento stav dočasně snášet. Pro zhasnutí výboje je nutno snížit urychlovací napětí hluboko pod napětí zápalné. Tato manipulace je při použití desetiotáčkového potenciometru, potřebného pro citlivé hledání extrémů příliš zdlouhavá. Přípravek je proto vybaven tlačítkem, jehož stisknutím se přeruší přívod mřížky a výboj zhasne. Pro zamezení jeho opětovného vzniku pak stačí pouze mírné snížení napětí.

Napájení

Měřicí přípravek a žhavení elektronky jsou napájeny z upraveného laboratorního zdroje B3-5. Topení a regulátor topení pak přímo ze sítě 220 V.

NEROZPOJUJTE PROPOJENÍ MEZI ZDROJEM A PŘÍPRAVKEM!

1.3 Postup měření

1. Ujistíme se, zda je vypínač „TOPENÍ“ na panelu vedle regulátoru topení vypnut (poloha „0“) a skutečná teplota v pícce (červený displej) má hodnotu pokojovou nebo několika desítek °C po předchozím měření. V případě nesouladu uvedeme přístroj do požadovaného výchozího stavu.
Poznámka: Regulátor topení nemá síťový vypínač a zůstává zpravidla trvale zapnut. V případě potřeby jej lze odstavit vytažením síťového přívodu. V laboratoři je vypínání zajištěno centrálně.
2. Nastavíme první (nejnižší) zvolenou teplotu, při níž budeme měřit.
POZOR! ROZDÍL MEZI LIBOVOLNOU DVOJICÍ ZVOLENÝCH TEPLOT NEMÁ BÝT MENŠÍ NEŽ 30 °C!
Zapneme vypínač „TOPENÍ“. K prvnímu ustálení teploty dojde po 10 - 15 minutách.
3. Potenciometr urychlovacího napětí i přepínač rozsahů nanoampérmetru vytočíme do levé krajní polohy (nulové napětí, maximální citlivost).
4. Zapneme napájecí zdroj experimentu a externí voltmetr.

5. Po ustálení teploty zvyšujeme postupně urychlovací napětí U_G a vyhledáváme minima proudu I_A . Zaměříme se přitom na přesné stanovení napětí pro jednotlivá minima. Pro jednu vybranou závislost odečteme mezi jednotlivými minimy ještě maximum a cca 4 další hodnoty potřebné ke grafickému zpracování. Tato napětí zaznamenejme.

POZOR! BĚHEM VLASTNÍHO MĚŘENÍ CHRAŇTE PÍCKU PŘED MECHANICKÝMI OTŘESY!

6. Tato měření zpracujeme graficky. Nastavíme druhou (vyšší) teplotu a vyčkáme jejího ustálení. Postupně proměříme a zaznamenejme minima, maxima o mezilehlé body v celém měřitelném rozsahu, potřebné ke grafickému zpracování.
7. Měření minim zopakujeme pro třetí (nejvyšší) teplotu.
8. Z naměřených hodnot odečteme všechny napěťové rozdíly mezi minimy. Tyto rozdíly přímo odpovídají hodnotám energie v jednotkách eV (elektronvolt⁴). Ze získaných hodnot stanovíme excitační energii atomu rtuťi. Výsledek uvedeme v elektronvoltech i Joulech. Porovnáme s tabulkovou hodnotou. Vypočteme vlnovou délku emitovaného světla.

1.4 Kontrolní otázky

1. Proč nedojde při vyšších teplotách elektronky k zapálení výboje?
2. Proč jsou skleněná okénka pícky překryta zevnitř kovovou sítkou spojenou vodičem s tělesem pícky?
3. Proč anodový proud elektronky klesá s její rostoucí teplotou?

1.5 Literatura

- [1] Jelen, J.: Fyzika II, skripta ČVUT, 2000.
- [2] Špolskij, E., V.: Atomová fyzika I, SNTL, 1957.
- [3] University laboratory experiments-Physics, Goettingen, 1994.
- [4] Hajko, V.: Fyzika v experimentoch, Veda, Bratislava 1988.
- [5] Úlehla, I., Suk, M., Trka, Z.: Atomy, jádra, částice, Academia, Praha, 1990.
- [6] Beiser, A.: Úvod do moderní fyziky, Academia, Praha 1975.

⁴Elektron získá průchodem mezi dvěma body pole s potenciálním rozdílem 1 V energii: $e \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ CV}$, která je v atomové fyzice jednotkou energie a nazývá se elektronvolt: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.