

Měření rezonančního a ionizačního potenciálu rtuti. Franckův-Hertzův pokus.

Franckův-Hertzův pokus

Cílem této úlohy je sledovat procesy, k nimž dochází při srážkách elektronů s atomy.

Studium těchto procesů sehrálo důležitou úlohu při rozvoji fyziky zvláště v období po roce 1913, kdy se objevuje a rozvíjí Bohrova teorie stavby atomu a atomárních dějů. Ve stejné době (1913-1914) byly publikovány základní práce J. Francka a G. Hertze, v nichž se v jednoduchém experimentálním uspořádání zjišťuje vliv procesů probíhajících při srážkách na vedení elektrického proudu v plynech a parách. V dalších letech následuje intenzivní rozvoj experimentálního výzkumu těchto jevů v řadě světových fyzikálních laboratoří. Přitom se ukázalo, že získané výsledky a jejich souvislosti se spektroskopickými daty nelze vysvětlit na základě starších fyzikálních představ, že však jsou v úplném souladu s Bohrovou teorií, pro kterou tím poskytují přesvědčivé experimentální ověření. J. Franck a G. Hertz byli za své práce v r. 1925 vyznamenáni Nobelovou cenou.

Podle základních představ kvantové teorie mohou elektrony v atomech existovat jen ve zcela určitých (stacionárních) stavech, kterým odpovídají diskrétní hodnoty vazebné energie elektronů s jádrem. Tyto hodnoty energie - *energetické hladiny*- jsou charakteristické pro daný druh atomů. Stav s nejnižší energií nazýváme základním stavem. Ponecháme-li izolovaný atom na některé vyšší energetické hladině, pak po určité době přechází buď přímo nebo přes některé jiné stavy do základního stavu. Přechod mezi stavy je přitom doprovázen vyzařováním elektromagnetického záření, jehož frekvence (či vlnová délka) souvisí s rozdílem energií výchozího a konečného stavu E podle vztahu

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

kde h je Planckova konstanta a c rychlost světla ve vakuu. Atom v základním stavu může na druhé straně být převeden do některého stavu s vyšší energií vhodným vnějším působením, říkáme, že je excitován a přechází do excitovaného stavu. V krajním případě může některý z elektronů v atomu získat vnějším působením takovou energii, že atom zcela opustí, pak mluvíme o ionisaci.

Vnějším působením, které atom vybudí ze základního stavu, může být srážka s elektronem. Při srážce má být splněn zákon zachování energie a hybnosti, proto výsledek srážky závisí na kinetické energii elektronu E_k . Byl-li elektron před srážkou urychlen potenciálovým rozdílem U , je jeho kinetická energie

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

kde e , m a v značí postupně náboj, hmotnost a rychlost elektronu. V závislosti na energii E_k mohou při srážce nastat tři možnosti:

1. Je-li kinetická energie elektronu E_k tak malá, že nedostačuje ani k převedení atomu do vzbuzeného stavu s nejnižší energií, zůstává atom po srážce v základním stavu. Vzhledem ke své malé hmotnosti pak elektron prakticky neztrácí energii. Těmto srážkám říkáme srážky pružné.
2. Má-li elektron dostatečnou energii, může při srážce převést atom ze základního stavu do některého stavu vzbuzeného. Elektron přitom ztrácí část své energie, která (opět

vzhledem k jeho malé hmotnosti) se téměř přesně rovná rozdílu energií obou stavů. Tyto srážky nazýváme nepružnými, či přesněji nepružnými srážkami prvního druhu. (Při nepružných srážkách druhého druhu musí být atom před srážkou ve vzbuzeném stavu, při srážce přejde na nižší energetickou hladinu a přebytečnou energii předá elektronu). Při nepružné srážce prvního druhu může elektron v krajním případě prakticky všechnu svou kinetickou energii předat vzbuzenému atomu, potřebné urychlující napětí U_{rn} pak nazýváme rezonančním potenciálem. Přejde-li atom po vzbuzení zpět do základního stavu, vyzařuje přitom elektromagnetické záření, pro jehož vlnovou délku λ_{rn} lze odvodit užitím (1), (2)

$$\lambda = \frac{hc}{eU_{rn}} \quad (3)$$

3. Každému z rezonančních potenciálů by tudíž ve spektru zkoumané látky měla odpovídat spektrální čára o vlnové délce určené vztahem (3). V dalším výkladu bude důležitý hlavně nejmenší z rezonančních potenciálů, tzv. první rezonanční potenciál, který označíme U_r . Aby mohla nastat nepružná srážka, musí zřejmě platit podmínka

$$U \geq U_r \quad (4)$$

4. Spektrální čára s vlnovou délkou λ_r

$$\lambda_r = \frac{hc}{eU_r} \quad (5)$$

5. odpovídá přechodu z nejnižšího vzbuzeného stavu do stavu základního. V souvislosti s luminiscenčními jevy bývá nazývána čarou rezonanční. Odtud pochází též název rezonančního potenciálu.
6. Při dalším zvýšení urychlujícího napětí může elektron při srážce atom ionisovat. Minimální hodnota urychlujícího napětí potřebná k ionisaci se nazývá ionizační potenciál. Ionizačnímu potenciálu U_i odpovídá hodnota vlnové délky λ_∞

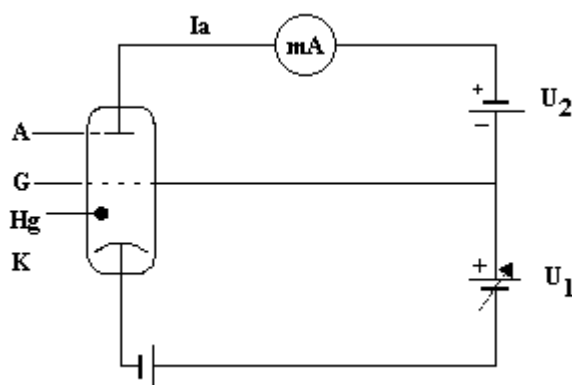
$$\lambda_\infty = \frac{hc}{eU_i} \quad (6)$$

7. Tato hodnota určuje ve spektru látky krátkovlnnou hranici jisté serie spektrálních čar, k níž se čáry serie stále více blíží, postupujeme-li k vyšším vzbuzeným stavům.

Popíšeme nyní v hlavních rysech uspořádání Franckova-Hertzova pokusu, který potvrzuje, že ke vzbuzení či ionisaci atomů skutečně dochází, ale dává též možnost určit první rezonanční potenciál.

Základní uspořádání pokusu a jeho výklad

Základem uspořádání je skleněná trubice se třemi elektrodami. V ose systému je katoda tvořená žhaveným vláknem, kolem níž jsou souose umístěny dva válce: vnitřní válec je proveden z drátu jako mřížka, vnější válec je z plechu. Na obr. 1 je schematické uspořádání trubice, elektrody jsou označeny písmeny **K** (katoda), **G** (mřížka), **A** (vnější válec). Poslední elektrodu lze sice podle analogie s obyčejnou triodou nazývat anodou, vzhledem k její funkci je však vhodnější název kolektor. Na rozdíl od běžných triod je mřížka umístěna ve větší vzdálenosti od katody v blízkosti kolektoru. Před odtavením vyčerpané trubice je dovnitř vpravena kapka rtuti a trubice je umístěna v píce, s jejíž teplotou se rovněž mění tlak nasycených par rtuti v baňce.

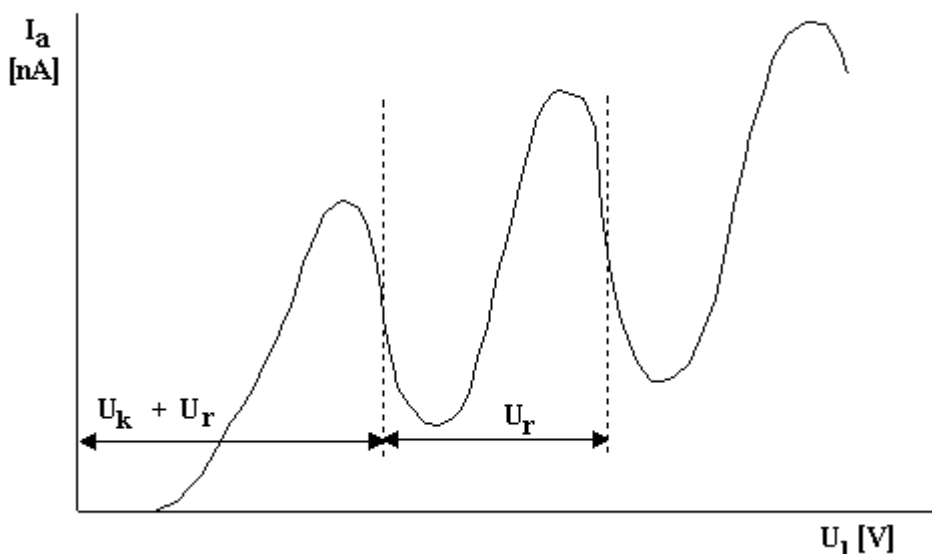


Obr. 1

Měření prvního rezonančního potenciálu provádíme v zapojení podle obr.1. Mezi mřížku a katodu je přiváděno regulovatelné napětí U_1 , které urychluje elektrony emitované z katody. Nanoampérmetrem nA měříme proud kolektorem I_a v závislosti na napětí U_1 . Napětí U_2 mezi kolektorem a mřížkou vytváří mezi těmito elektrodami brzdné pole. Velikost tohoto napětí se však při měření rezonančního potenciálu volí pouze několik desetin voltu, maximálně 1 V.

Při pokojové teplotě trubice je tlak rtuťových par uvnitř velmi malý (cca 0,2 Pa), takže srážky elektronů s atomy rtuti se prakticky neuplatní. Při zvyšování napětí U_1 se zvětšuje rychlost elektronů a roste i jejich proud, tekoucí na urychlující elektrodu, mřížku **G**. Elektrony, které prolétnou mezerami mřížky, snadno překonají slabé brzdící pole a dopadají na kolektor. Proto rovněž proud kolektorem monotonně roste a charakteristika, tj. závislost proudu kolektoru I_a na urychlujícím napětí U_1 připomíná charakteristiku obyčejné vakuové diody.

Pro měření rezonančního potenciálu je třeba ohřát trubici na teplotu 150° až 200°C a zvýšit tím tlak rtuťových par na hodnotu kolem 1 kPa. Střední volná dráha elektronu je pak podstatně menší než vzdálenost mezi katodou a mřížkou, takže každý elektron se na své dráze mnohokrát srazí s atomem rtuti. Na obr.2 je znázorněna charakteristika měřená za těchto podmínek.



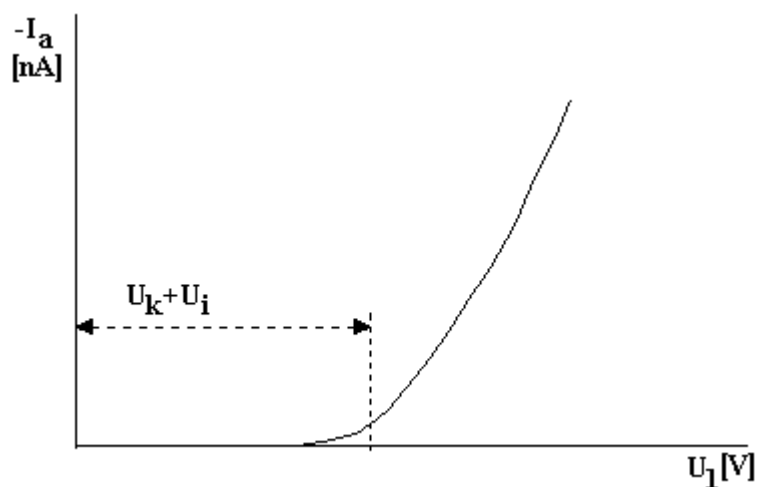
Obr. 2

Vysvětlíme si nyní příčinu poklesů, které pozorujeme na jejím průběhu. Při malých urychlovacích napětích jsou srážky elektronů s atomy pružné. Elektronové při nich neztrácejí rychlost, získávají tedy cestou k mřížce dodatečnou energii, aby překonaly brzdící pole mezi mřížkou a kolektorem. Proud I_a tedy při zvětšování napětí U_1 roste podobně jako tomu bylo při nízkém tlaku rtuťových par. Dosáhne-li však urychlovací napětí hodnoty prvního rezonančního potenciálu, probíhají v blízkosti mřížky také nepružné srážky, při nichž elektrony ztrácejí veškerou svou kinetickou energii. Nemohou pak překonat brzdící pole u kolektoru a proud kolektoru výrazně poklesne. Při dalším zvyšování urychlovacího napětí se prostor nepružných srážek posouvá směrem ke katodě. Elektrony, které již odevzdaly svoji energii atomům rtuti, jsou dále urychlovány. Proud elektronkou roste do té doby, dokud elektrony nedosáhnou v blízkosti mřížky opět energie potřebné k převedení atomů rtuti do vzbuzeného stavu. V tomto okamžiku se proces opakuje a proud elektronkou opět poklesne. Proud kolektoru tedy bude periodicky klesat, jak to vidíme na obr.2 a z poloh jednotlivých poklesů je možno určit polohu prvního rezonančního potenciálu U_r . Je zřejmé, že toto měření neposkytuje informaci o hodnotách dalších rezonančních potenciálů.

Při vyhodnocení proměřené charakteristiky je třeba přihlédnout k tomu, že pole mezi katodou a mřížkou je určeno nejen napětím ve vnějším obvodu U_1 , ale přispívá k němu též kontaktní rozdíl potenciálů U_k , který se rovná rozdílu výstupních prací mřížky a katody. Tím je celá charakteristika posunuta podél osy napětí U_1 o odpovídající vzdálenost. K určení rezonančního potenciálu U_r je proto třeba proměřit na charakteristice alespoň dva poklesy. Hodnotu U_r určíme z jejich vzdálenosti. Z polohy prvního poklesu pak můžeme určit také hodnotu kontaktního rozdílu potenciálů U_k , jak je vyznačeno na obr.2.

Pro měření ionizačního potenciálu U_i musíme volit nižší teplotu v pícce, asi 80°C , a tím i nižší tlak rtuťových par, přibližně 10 Pa. Jinak lze použít stejného zapojení podle obr.1 až na to, že brzdící napětí U_2 volíme během celého měření poněkud vyšší než je urychlovací napětí U_1 . Za této podmínky je zřejmé, že elektrony emitované katodou nemohou dosáhnout kolektoru. Proud kolektorem I_a bude tedy při nejnižších napětích nulový a začne podstatně vzrůstat teprve při urychlovacích napětích větších než ionizační potenciál. Tehdy vznikají v okolí mřížky ionty, které urychleny napětím U_2 , dopadají na kolektor. Polarita proudu je ovšem

opačná než při měření rezonančního potenciálu. Charakteristika je znázorněna na obr.3. Hodnotu ionizačního potenciálu určíme z napětí, při němž proud začíná výrazně vzrůstat.



Obr. 3

Při měření se přirozeně opět uplatňuje kontaktní rozdíl potenciálů U_k a odečtené napětí je třeba opravit o tuto hodnotu, kterou jsme určili při měření rezonančního potenciálu.

Přesnost získané hodnoty je nepříznivě ovlivněna tím, že nárůst proudu není ostrý, ale má delší táhlý náběh. To může být způsobeno více příčinami:

1. K proudu kolektoru I_a přispívá též proud fotoelektronů uvolněných z povrchu kolektoru dopadem elektromagnetického záření, které vysílají atomy rtuti vzbuzené při srážkách.

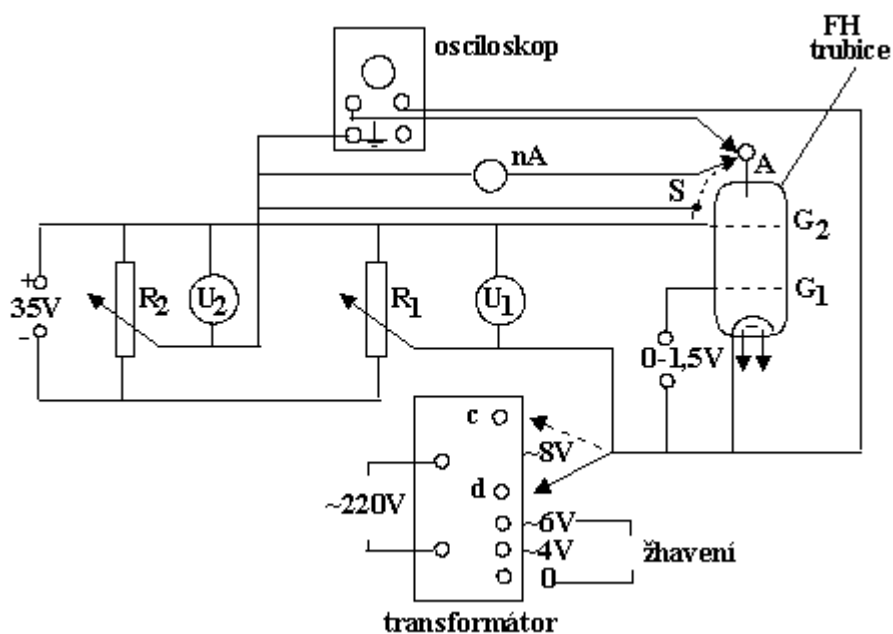
Proud protéká i při urychlujícím napětí menším než ionizační potenciál, je-li dostatečné alespoň ke vzbuzení atomu. S rostoucím urychlujícím napětím proud vzrůstá a jeho závislost na tomto napětí, pokud se dostatečně podrobně proměří ve vhodném uspořádání, vykazuje řadu ostrých zlomů, z nichž lze určit kromě prvního též vyšší rezonanční potenciály [14]. Při našem způsobu měření ionizačního potenciálu však tento proud představuje parazitní efekt a není-li podstatně menší než proud iontový, může značně zkreslit výsledek.

2. Elektrony emitované z katody mají různé počáteční rychlosti, takže jsou samy schopny ionisovat i po průchodu menším potenciálním rozdílem, než je ionizační potenciál.
3. Brzdné pole vytvořené napětím U_2 proniká do prostoru v okolí mřížky a brzdí zde částečně elektrony provádějící ionisaci.

Uvedené nepříznivé vlivy lze odstranit a získat tak hodnotu ionizačního potenciálu s vyšší přesností. Vyžaduje to však mnohem složitější uspořádání experimentu [12].

Zapojení a postup při měření

Měření provádíme v zapojení podle obr.4 s elektronkou, vyráběnou speciálně k demonstraci Franckova-Hertzova pokusu (výrobce Leybold).



Obr. 4

Katoda je nepřímo žhavena, žhavení se napájí z vinutí transformátoru s napětím 6,3 V.

Ke stejnosměrnému napájení elektronky používáme stabilizovaného napěťového zdroje, který obsahuje dva nezávislé regulovatelné zdroje napětí. Z jednoho zdroje odebíráme napětí pro řídicí mřížku G_1 (toto napětí by nemělo přesáhnout 4 V), z druhého přivádíme jeho maximální napětí 35 V na potenciometry R_1 , R_2 . Potenciometrem R_1 regulujeme urychlující napětí mezi katodou a mřížkou G_2 , potenciometrem R_2 brzdné napětí mezi mřížkou G_2 a kolektorem. Obě tato napětí odečítáme na voltmetrech.

Pro měření rezonančního potenciálu nastavíme potenciometrem R_2 vhodnou hodnotu napětí U_2 (asi 1 V). Při měření ionizačního potenciálu můžeme změnou napětí U_1 současně měnit napětí U_2 tak, aby bylo vždy o několik voltů vyšší než U_1 . Jednodušší však je, ponechat během celého měření napětí U_2 na maximální hodnotě (asi 35 V). V obou případech se při vedení proudu v obvodu kolektoru uplatňují pouze ionty, případně fotoelektrony a dostáváme prakticky stejný průběh charakteristiky.

Napětí mřížky G_1 volíme tak, abychom dosáhli potřebné velikosti proudu kolektoru. Je vhodné pracovat s co nejmenšími proudy, abychom omezili vliv prostorového náboje a zmenšili možnost zapálení samostatného výboje v elektronce.