

1 Pracovní úkol

1. Změřte charakteristiky Franck-Hertzovy trubice při pokojové teplotě a při dvou vyšších teplotách baňky t_1 a t_2 . Při nejvyšší teplotě a při teplotě pokojové volte pro napětí kolektoru a urychlující elektrody malou zápornou hodnotu (do -1V). Při měření při teplotě t_1 volte pro toto napětí maximální zápornou hodnotu (cca -35V).
2. V průběhu ohřívání či chlazení trubice sledujte na obrazovce osciloskopu změny, ke kterým dochází a kvalitativně je popište. Pokuste se podat vysvětlení těchto změn.
3. Z naměřených závislostí určete kontaktní rozdíl potenciálů mezi katodou a urychlující elektrodou trubice, rezonanční a ionizační potenciál atomu rtuti a vlnovou délku odpovídající rezonančnímu přechodu. Objasněte, proč je vhodné ionizační potenciál určovat při nižší teplotě píčky než potenciál excitační.

2 Teoretický úvod

2.1 Srážky

Podle základních představ kvantové teorie mohou elektrony v atomu existovat jen v určitých stacionárních stavech, kterým odpovídají diskrétní hodnoty vazebné energie elektronu s jádrem. Tyto energetické hladiny jsou charakteristické pro daný druh atomu. Stav s nejnižší energií se nazývá základní stav atomu. Každý izolovaný atom, ponechaný na některé vyšší hladině, po určité době přejde do základního stavu. Při tom vyzáří elektromagnetické záření, jehož frekvence ν (resp. vlnová délka λ) souvisí s rozdílem energií obou stavů dle vztahu:

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

kde h je Planckova konstanta a c je rychlost světla ve vakuu.

Atom v základním stavu může být naopak působením vhodných vnějších podmínek převeden do stavu s vyšší energií - excitovaného stavu. V krajním případě může některý elektron získat takovou energii, že atom zcela opustí - atom ionizuje.

Vnější působení, které atom excituje, může být např. srážka s elektronem. Aby byly splněny zákony zachování energie a hybnosti, závisí výsledek srážky na kinetické energii elektronu E_k . Byl by elektron urychlen napětím U , je jeho kinetická energie:

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

kde m , v , e je postupně hmotnost, rychlost a náboj elektronu.

Při srážce mohou 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. Tyto srážky nazýváme pružné.

2. Má-li elektron dostatečnou energii, může při srážce převést atom do excitovaného stavu. Elektron při tom ztrácí energii, která se téměř přesně rovná rozdílu energií obou stavů. Tyto srážky se nazývají nepružné srážky prvního druhu. V krajním případě může elektron předat vzbuzenému atomu prakticky všechnu svou kinetickou energii; potřebné urychlující napětí nazýváme rezonančním potenciálem U_{rn} . Přejde-li atom poté zpět do základního stavu, vyžáří přitom elmag. záření, pro jehož vlnovou délku λ_{rn} platí (využitím (1) a (2)):

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

Důležitý je zejména první rezonanční potenciál U_r . Aby mohla nastat nepružná srážka, musí zřejmě platit:

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

Přechodu z nejnižšího vzbuzeného do základního stavu odpovídá spektrální čára s vlnovou délkou λ_r :

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

Tato čára bývá nazývána čarou rezonanční.

3. Při dalším zvýšení urychlujícího napětí může elektron atom ionizovat. Minimální hodnota urychlujícího napětí potřebná k ionizaci se nazývá ionizační potenciál U_i . Jemu odpovídá vlnová délka λ_∞ :

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

2.2 uspořádání pokusu

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 (příloha 1) je schematické uspořádání trubice, elektrody jsou označeny písmeny K (katoda), G (mřížka), A (vnější válec). Poslední elektroda se vzhledem k její funkci většinou nazývá kolektor. Před zatavením vyčerpané trubice je dovnitř vpravena kapka rtuti a trubice je umístěna v pícce, s jejíž teplotou se rovněž mění tlak nasycených par rtuti v baňce.

pokojová teplota

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 mřížku G. Elektrony, které prolétnou mezerami mřížky, snadno překonají slabé brzdné pole a dopadají na kolektor. Proto rovněž proud kolektorem monotónně roste a voltampérová charakteristika připomíná charakteristiku vakuové diody.

rezonanční potenciál

Měření prvního rezonančního potenciálu provádíme v zapojení podle obr.1 (příloha 1). Mezi mřížku a katodu je přiváděno regulovatelné napětí U_1 , které urychluje elektrony emitované z katody. Ampérmetrem mA 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 brzdného napětí se pro měření rezonančního potenciálu volí pouze 1V.

Při měření rezonančního potenciálu je třeba trubici ohřát na teplotu 150-200°C a zvýšit tím tlak rtuťových par na hodnotu cca 1kPa. Střední volná dráha je pak podstatně nižší než vzdálenost mezi katodou a mřížkou, takže každý elektron se na své dráze mnohokrát srazí s atomy rtuti. Charakteristika měřená za těchto podmínek je na obr.2 (příloha 1).

Při malých urychlujících napětích jsou srážky elektronů s atomy pružné. Elektrony 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 urychlující napětí hodnoty prvního rezonančního potenciálu, probíhají v blízkosti mřížky také nepružné srážky, při nichž elektrony ztrácí veškerou svou kinetickou energii. Nemohou pak překonat brzdné pole u kolektoru a proud kolektoru výrazně poklesne. Při dalším zvyšování urychlujícího napětí se prostor nepružných srážek posunuje 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. Z poloh jednotlivých poklesů je možné určit hodnotu rezonančního potenciálu U_r (viz obr.2).

Při vyhodnocení charakteristiky je třeba přihlédnout k tomu, že na napětí mezi katodou a mřížkou se podílí i kontaktní rozdíl potenciálů U_k (rozdíl výstupních prací mřížky a katody).

ionizační potenciál

Pro měření ionizačního potenciálu U_i musíme volit nižší teplotu v píce, asi 80C, a tím i nižší tlak rtuťových par, přibližně 10 Pa. Jinak lze použít stejného zapojení podle obr.1, ale brzdné napětí U_2 volíme během celého měření vyšší než je urychlující 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 urychlujících 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 (příloha 1). Hodnotu ionizačního potenciálu určíme z napětí, při kterém proud začíná výrazně vzrůstat.

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.

3 Výsledky měření

3.1 pokojová teplota

tab.1: VA charakteristika F.-H. trubice, $t \doteq 23^\circ\text{C}$, $U_2=1\text{V}$

U (V)	0	2	6,1	8,1	10	12	14	16,7
I (10^{-9} A)	0,0	0,0	0,5	3,0	4,5	5,5	6,5	9,5
U (V)	18,5	20,2	22,1	24,6	26,5	30	32	34,3
I (10^{-9} A)	11,0	13,5	15,5	17,5	19,5	23,0	25,5	27,5

Graf závislosti viz příloha 2.

3.2 ionizační potenciál

tab.2: VA charakteristika F.-H. trubice, $t \doteq 80^\circ\text{C}$, $U_2=35\text{V}$

U (V)	0,0	5,1	10,0	10,9	11,9	12,9	13,5	14,0	14,3	14,5	14,8
I (10^{-10} A)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	0,6	0,8	1,0	1,5
U (V)	15,1	15,5	15,7	16,0	16,5	17,0	17,5	18,0	18,6	19,2	19,5
I (10^{-10} A)	2,2	3,0	3,8	5,0	7,1	9,8	12,5	15,5	18,0	23,0	26,5

Graf závislosti viz příloha 2.

Ionizační potenciál určený z grafu č.2 (hodnota U_k byla zjištěna z měření rezonančního potenciálu):

$$U_i + U_k = (13,5 \pm 0,3)\text{V}$$

$$U_i = (11,9 \pm 0,6)\text{V}$$

3.3 rezonanční potenciál

tab.3: VA charakteristika F.-H. trubice, $t \doteq 150\text{--}200^\circ\text{C}$, $U_2=1\text{V}$

U (V)	0,0	1,0	3,0	4,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
I (10^{-10} A)	0,0	0,0	0,1	1,0	1,5	2,5	4,0	3,5	1,5	0,8	1,0	1,8	2,5
U (V)	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,5	15,5	16,0	16,5	17,0
I (10^{-10} A)	5,0	5,5	7,5	8,0	3,5	2,5	2,5	3,0	5,5	9,0	11,0	11,5	8,5
U (V)	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5	20,5	21,0	21,5	21,7	22,0	22,5	23,0	23,5
I (10^{-10} A)	7,0	6,0	5,5	6,5	8,0	12,5	15,0	16,8	17,5	17,0	16,0	15,0	13,5
U (V)	24,0	24,5	25,0	25,5	26,0	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5	30,0
I (10^{-10} A)	13,0	14,0	16,0	19,0	22,0	24,5	27,0	28,0	29,0	28,0	27,0	26,0	27,0

Grafy závislostí viz příloha 2.

Zjištěné hodnoty rezonančního potenciálu:

$$U_{r1} = (5,08 \pm 0,19)\text{V}$$

$$U_{r2} = (5,53 \pm 0,19)\text{V}$$

$$U_{r3} = (5,35 \pm 0,19)\text{V}$$

$$\text{průměrná hodnota: } U_r = (5,3 \pm 0,3)\text{V}$$

$$U_r + U_k = (6,9 \pm 0,2)\text{V} \Rightarrow \text{kontaktní potenciál: } U_k = (1,6 \pm 0,3)\text{V}$$

$$\lambda_r = (212 \pm 20)\text{nm}$$

4 Diskuze

Naměřené VA charakteristiky v mezích chyb odpovídají teoretickým předpokladům. Charakteristika naměřená při pokojové teplotě svým průběhem odpovídá lineárnímu prvku podle teorie by však měla charakteristika odpovídat charakteristice vakuové diody.

Chyby zjištěných potenciálů a rezonanční vlnové délky byly určovány odhadem. Největší chyba byla způsobena nepřesným odečítáním z grafů. Zjištěná hodnota ionizačního potenciálu je velmi ovlivněna tím, že určení napětí, při kterém proud začíná výrazně růst, je subjektivní.

Vzhledem k nefunkčnosti osciloskopu nebylo možno pozorovat změny při ohřívání.

Při určování rezonančního potenciálu je vhodné, když střední volná dráha emitovaných elektronů je mnohonásobně kratší než vzdálenost mezi katodou a kolektorem a tedy mnoho elektronů předá svoji energii atomům rtuti. Proto je dobré, aby v trubici byla vysoká koncentrace rtuťových par, tedy relativně velmi vysoká teplota. Při určování ionizačního potenciálu by střední volná dráha elektronů měla být dostatečně dlouhá, aby elektrony mohly nabrat energii potřebnou k ionizaci atomů rtuti. Proto by koncentrace rtuťových par měla být nižší než při určování rezonančního potenciálu. Musí být proto nižší i teplota.

5 Závěr

ionizační potenciál: $U_i = (11,9 \pm 0,6)\text{V}$

rezonanční potenciál: $U_r = (5,3 \pm 0,3)\text{V}$

rezonanční vlnová délka: $\lambda_r = (212 \pm 20)\text{nm}$

kontaktní potenciál: $U_k = (1,6 \pm 0,3)\text{V}$

6 Literatura

- [1] Fyzikální praktikum III-Optika, UK v Praze, 1993
- [2] Matematické, fyzikální a chemické tabulky, SPN, Praha 1970