

Pracovní úkoly

1. Změřte charakteristiky Franck-Hertzovy trubice s parami rtuti při pokojové teplotě a při dvou vyšších teplotách baňky t_1 , t_2 . Při nejvyšší teplotě a při teplotě pokojové volte pro napětí kolektoru proti urychlující elektrodě malou zápornou hodnotu (kolem $-1,5 \text{ V}$). Při měření při teplotě t_1 volte pro toto napětí maximální zápornou hodnotu (cca -30 V).
2. V průběhu ohřívání trubice na teplotu t_2 sledujte pomocí osciloskopu změny, ke kterým dochází, a kvalitativně je popište. Proud trubici udržujte v dovolených mezích (do 30 nA) vhodnou volbou předpětí první mřížky (v rozmezí od $-1,5$ do $+1 \text{ V}$). Pokuste se podat vysvětlení těchto změn.
3. Z naměřených závislostí určete kontaktní rozdíl potenciálů mezi katodou a urychlující elektrodou trubice, rezonanční a ionizační potenciál atomů rtuti a vlnovou délku odpovídající rezonančnímu přechodu. Objasněte, proč je vhodné ionizační potenciál určovat při nižší teplotě píčky, než potenciál excitační.
4. **Výběrová úloha:** Změřte charakteristiku Franck-Hertzovy trubice s neonem až do 99 V . Při měření sledujte, jak se při nárůstu napětí U_1 mění počet svítících vrstev v prostoru mezi mřížkami. Pomocí manuálního nastavení napětí U_1 určete závislost počtu svítících vrstev na jeho velikosti.

Teoretická část

Elektron urychlený napětím U získá kinetickou energii E , pro jejíž velikost platí:

$$E = eU \quad (1)$$

Kde e je elementární náboj. Pokud se tento elektron srazí s atomem rtuti, může nastat několik případů [1]:

- Pružná srážka: Energie elektronu je tak malá, že nemůže způsobit excitaci v atomu a tudíž nedochází ke ztrátě energie.
- Nepružná srážka: Energie je dostatečná pro excitaci elektronů v elektronovém obalu atomu rtuti. Pokud je spotřebovaná veškerá energie přilétávajícího elektronu, napětí, kterým byl elektron urychlen, nazveme rezonančním potenciálem U_r .
- Ionisace: Energie je dostatečná pro ionisaci atomu rtuti. Minimální napětí, kterým je potřeba urychlit elektron se nazývá ionizační potenciál a značí se U_i .

Měření potenciálů U_r a U_i probíhá pomocí Franck-Hertzovy trubice, která sestává z katody K , dvou mřížek G_1 , G_2 a kolektoru A . Napětí mezi mřížkou G_1 a katodou označíme jako U_{G1K} . Urychlující napětí mezi katodou a mřížkou G_2 označíme jako U_1 . Napětí mezi kolektorem a mřížkou G_2 označíme jako U_{G2A} . Proud kolektorem označíme jako I .

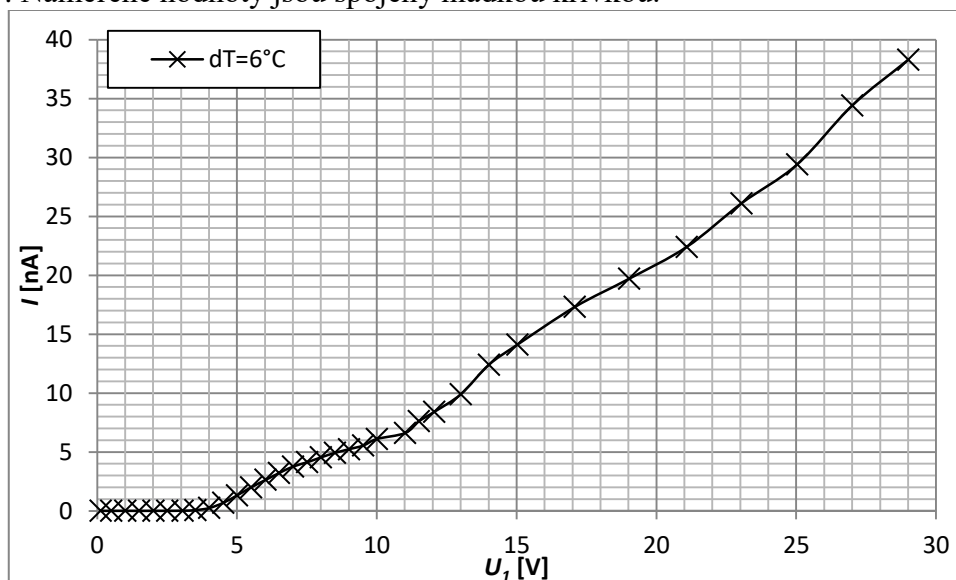
Pro vztah mezi urychlujícím napětím U_r a vlnovou délkou odpovídajícího rezonančního přechodu platí následující vztah [1]:

$$\lambda_r = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{U_r} \quad (2)$$

Kde h je Planckova konstanta a c je rychlost světla.

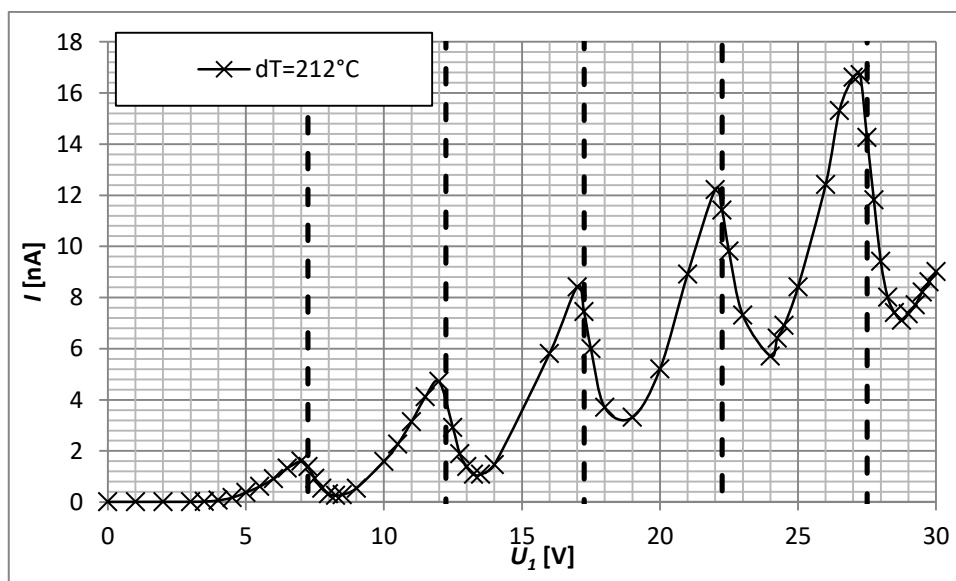
Výsledky měření

Graf č. 1 ukazuje závislost proudu kolektorem I na urychlujícím napětí U_1 při pokojové teplotě. Teplotní rozdíl trubice a okolím byl 6°C . Napětí U_{G2A} bylo -1.5 V a napětí U_{G1K} bylo -1.305 V . Naměřené hodnoty jsou spojeny hladkou křivkou.



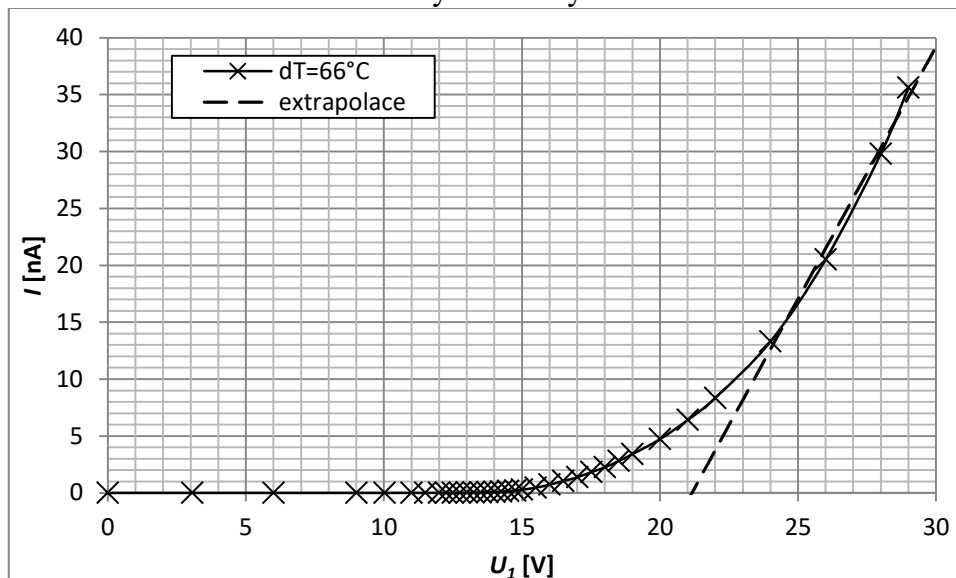
Graf 1: V-A charakteristika při pokojové teplotě, $U_{G2A} = -1.5\text{ V}$, $U_{G1K} = -1.305\text{ V}$.

Graf č. 2 zobrazuje závislost proudu kolektorem na urychlujícím napětí při teplotním rozdílu 212°C . Při takto vysoké teplotě značně snížíme střední volnou dráhu elektronů v trubici, tudíž ke srážkám mezi elektrony a rtuťovými atomy dochází častěji. Napětí U_{G2A} bylo -1.5 V a napětí U_{G1K} bylo -0.269 V . V grafu jsou čárkovaně vyznačená resonanční napětí.



Graf 2: V-A charakteristika při teplotním rozdílu 212°C , $U_{G2A} = -1.5\text{ V}$, $U_{G1K} = -0.269\text{ V}$. V grafu jsou čárkovaně vyznačené resonanční potenciály U_{rn} .

V grafu č. 3 je znázorněna závislost proudu kolektorem na urychlujícím napětí při teplotním rozdílu 66°C . Napětí U_{G2A} bylo -1.5 V a napětí U_{G1K} bylo -0.269 V . V grafu je vynesena čára použitá k extrapolaci na nulovou hodnotu proudu. Extrapolace je nezbytná, protože zlom na křivce V-A charakteristiky není ostrý.



Graf 3: V-A charakteristika při teplotním rozdílu 66°C , $U_{G2A} = -30\text{ V}$, $U_{G1K} = -0.902\text{ V}$.

V tabulce č. 1 jsou hodnoty rezonančních napětí z grafu 2. Abychom zjistili hodnotu rezonančního napětí U_r musíme hodnoty z tabulky č. 1 proložit přímkou $U_{nr}(U_r) = nU_r + U_k$, kde n je „řád“ resonance, U_k je kontaktní potenciál mezi katodou a mřížkou. Tabulka č. 2 obsahuje hodnoty U_r a U_k zjištěné lineární regrese. Uvedená chyba je nepřesnost koeficientů, zjištěná pomocí regrese. V tabulce je navíc uveden ionizační potenciál U_i . Ionizační potenciál jsme určili tak, že od hodnoty, kde extrapolací křivka protíná nulovou hodnotu proudu, jsme odečetli kontaktní potenciál. Chybu ($U_i + U_k$) jsme odhadli jako 1 V . Chybu U_i jsme poté určili metodou přenosu chyby. Ze vzorce (2) jsme určili vlnovou délku odpovídající rezonančnímu přechodu jako $\lambda_r = (245.5 \pm 1.4)\text{ nm}$. Nepřesnost určení vlnové délky jsme spočetli pomocí metody přenosu chyby při nepřímém měření.

Tabulka 1: Resonanční napětí pro různé stupně resonance

n	U_m [V]
1	7.25
2	12.25
3	17.25
4	22.25
5	27.5

Tabulka 2: Resonanční a kontaktní potenciál

U_r [V]	5.05 ± 0.03
U_k [V]	2.15 ± 0.10
U_i [V]	19.0 ± 1.2

Diskuse

S rostoucí teplotou rtuti narůstá počet srážek volných elektronů s atomy rtuti. Zvyšováním teploty tedy efektivně snižujeme střední volnou dráhu elektronů. Pokud jsou srážky nepružné, ztrácí elektrony energii, která je spotřebovaná na excitaci. Ionizační

potenciál musíme měřit při velkém brzděném napětí. Je zde zapotřebí minimalizovat srážky způsobující excitaci, aby se energie elektronů využívala k ionisaci atomů. Měření ionizačního potenciálu je tedy výhodnější při nižší teplotě, než měření rezonančního potenciálu.

Při měření při pokojové teplotě jsme pozorovali V-A charakteristiku podobnou vakuové triodě (viz graf 1), což jsme vzhledem k nízkému tlaku rtuťových par očekávali. Při teplotním rozdílu 66°C jsme bylo možné při vysokém brzděném napětí sledovat ionisaci atomů rtuti. Při dalším zvyšování teploty jsme pomocí osciloskopu pozorovali, jak se V-A charakteristika postupně „zvlňuje“.

Největším zdrojem nepřesností měření bylo určení rezonančních napětí U_{rn} a ionizačního napětí ($U_i + U_k$). Zatímco pro určení rezonančního potenciálu U_r nebyla tato nepřesnost tolik významná, protože jsme mohli použít lineární regresi, při určování ionizačního potenciálu byla tato nepřesnost značná. Navíc při určování ionizačního napětí ($U_i + U_k$) hrála velkou roli neostrost zlomu na V-A charakteristice (viz graf 3), způsobená zejména proudem fotoelektronů uvolněných z povrchu kolektoru fotony, které uvolnily atomy rtuti excitované při srážkách s elektrony [1].

Závěr

Naměřené závislosti odpovídají teoretickým předpokladům.

Zjistili jsme kontaktní potenciál Franck-Hertzovy trubice: $U_k = (2.15 \pm 0.10) \text{ V}$, rezonanční potenciál rtuti: $U_r = (5.05 \pm 0.03) \text{ V}$ a ionizační potenciál: $U_i = (19.0 \pm 1.2) \text{ V}$.

Dále jsme určili vlnovou délku odpovídající rezonančnímu přechodu: $\lambda_r = (245.5 \pm 1.4) \text{ nm}$.

Literatura

- [1] Měření rezonančního a ionizačního potenciálu rtuti. Franckův-Hertzův pokus. *Fyzikální praktikum* [online]. [cit. 1. 1. 2018]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_416.pdf