

Pracovní úkol

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 (do -1 V). Při měření při teplotě t_1 volte pro toto napětí maximální zápornou hodnotu (cca -35 V).
2. V průběhu ohřívání trubice na teplotu t_2 sledujte změny, ke kterým dochází a kvalitativně je popište. Proud trubici udržujte v dovolených mezích (do 50 nA) vhodnou volbou žhavicího napětí (v rozmezí od 4 do 6 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.

Teorie

Podle kvantové teorie mohou v atomech elektrony existovat jen v diskrétních stavech s určitými hodnotami energie. Elektronu v atomu můžeme dodat energii vnějším působením, například srážkou s vnějším elektronem. Kinetická energie elektronu urychlovaného napětím U je [1]:

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

Pokud je tato energie nízká, dojde k pružné srážce a atom není excitován. Při vyšší energii dojde k přeskočení elektronu na vyšší hladinu – excitaci atomu – a elektron odevzdá část své energie. Pokud elektron přijde o prakticky veškerou kinetickou energii, nazýváme potřebné urychlovací napětí rezonančním potenciálem U_r . V naší úloze budeme měřit nejmenší rezonanční potenciál.

Při zpětné deexcitaci vyzáří atom o energii [1]:

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

kde λ je vlnová délka vyzářeného fotonu, h je Planckova konstanta, c rychlost světla.

Tato energie je stejná, jako ta, kterou získal atom od urychleného elektronu, tedy platí:

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

Pokud má urychlený elektron ještě vyšší energii, může dojít také k ionizaci – vyražení elektronu z obalu atomu. Minimální hodnota urychlujícího napětí potřebná k ionizaci je ionizační potenciál U_i . Při měření ionizačního potenciálu je nutné zvýšit brzdné napětí, abychom neměřili volné elektrony. Měříme naopak proud dopadajících kladných iontů. Ty se začnou emitovat právě při překročení potřebného urychlovacího napětí nalétávajících elektronů.

Ke studiu procesů budem používat Franck-Hertzovu trubici. Ta je tvořena baňkou s katodou, kolektorem a mřížkou mezi nimi. V baňce je přidána kapka rtuti a tedy i rtuťových par, se kterými interagují prolétávající elektrony. Při zahřívání trubice ovlivňujeme hustotu par a tedy i střední volnou dráhu elektronů. Přivedením různých napětí na mřížku je regulováno urychlovací napětí elektronů.

Konkrétní uspořádání experimentu je zobrazeno v [1].

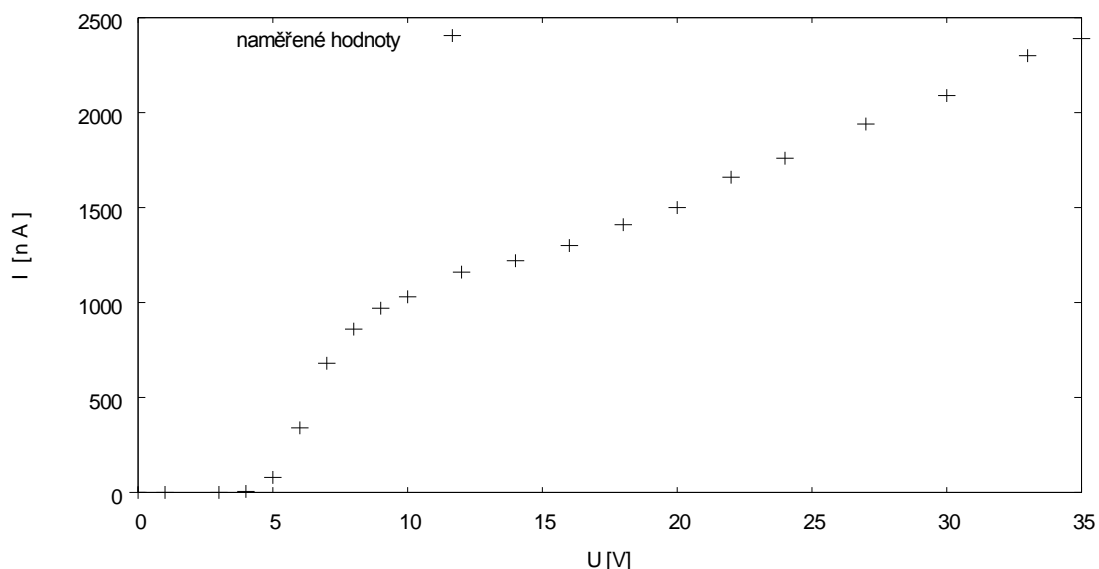
Výsledky měření

Nejprve jsem naměřila volt-ampérovou charakteristiku Franck-Hertzovy trubice s kapkou rtuti za pokojové teploty. Brzdné napětí při tomto měření bylo $U=1V$. Tato charakteristika je v Tabulce I a zobrazena v Grafu I. Hodnoty napětí uvedené v tabulkách jsou napětí na katodě. Chyby odečtení proudu uváděné v tabulkách s charakteristikami jsou určeny z pozorovaných fluktuací proudu při experimentu.

Tabulka I – V-A charakteristika za pokojové teploty

U [V]	-I [nA]	σ_I [nA]	U [V]	-I [nA]	σ_I [nA]
0	0	-	14	1220	10
1	0,001	0,0005	16	1300	20
3	0,04	0,01	18	1410	20
4	5,2	0,1	20	1500	20
5	78,8	1	22	1660	10
6	340	10	24	1760	10
7	680	10	27	1940	10
8	860	10	30	2090	10
9	970	10	33	2300	20
10	1030	10	35	2390	20
12	1160	10	-	-	-

Graf I - V-A charakteristika Franck-Hertzovy trubice za pokojové teploty

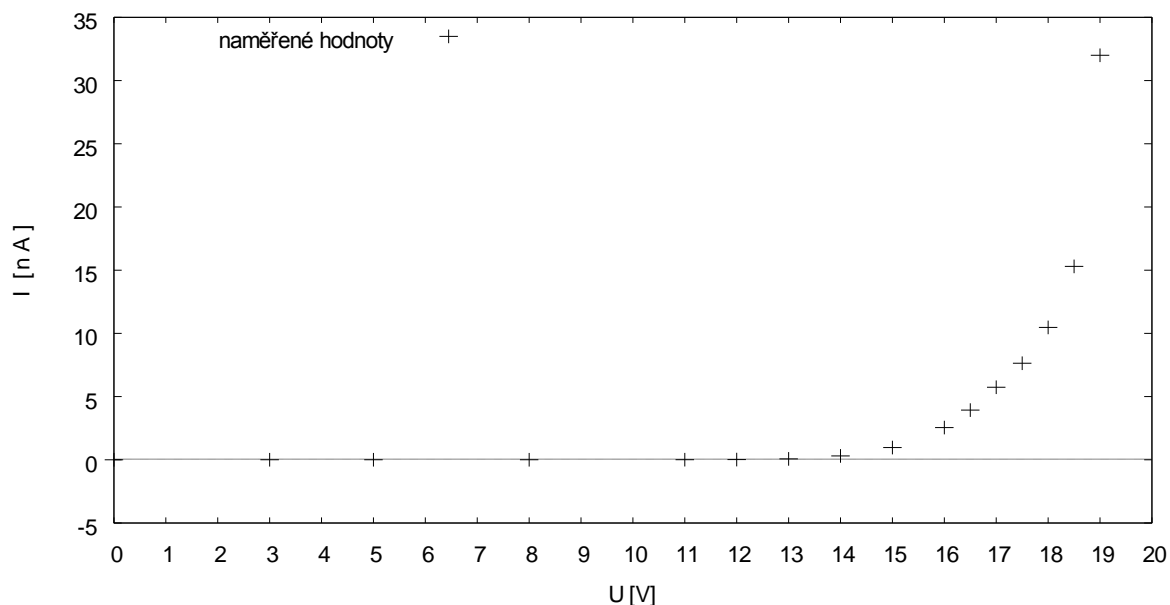


Abychom dosáhli potřebné koncentrace par rtuti, bylo nutné pro určení inizačního potenciálu navýšit teplotu. Tu jsme navyšovali pískou a odečítali ji pomocí termočlánku. Hodnota napětí na termočlánku se ustálila na (4,5 – 4,6)mV, což odpovídá teplotě ve Franck-Hertzově trubici 80°C. Pro toto měření bylo nutné zvýšit brzdné napětí, to jsme nastavili na U=35V. Měřený proud má opačné znaménko, protože byl měřen tok dopadajících kladných iontů, ne záporných elektronů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulce II a zaneseny do Grafu II.

Tabulka II – V-A charakteristika při teplotě t=80°C

U [V]	I [nA]	σ_I [nA]	U [V]	I [nA]	σ_I [nA]
0	0	0	18,5	15,3	0,2
3	0,003	0,0005	19	32	1
5	0,003	0,0005	19,5	61	1
8	0,003	0,0005	20	93	2
11	0,008	0,001	20,5	143	3
12	0,017	0,001	21	197	5
13	0,072	0,005	22	306	5
14	0,307	0,001	23	400	15
15	0,97	0,005	24	530	15
16	2,55	0,005	26	765	15
16,5	3,93	0,05	28	1018	10
17	5,74	0,05	30	1210	20
17,5	7,64	0,05	32	1460	20
18	10,47	0,05	34,8	1734	20

Graf II - Určení ionizačního potenciálu



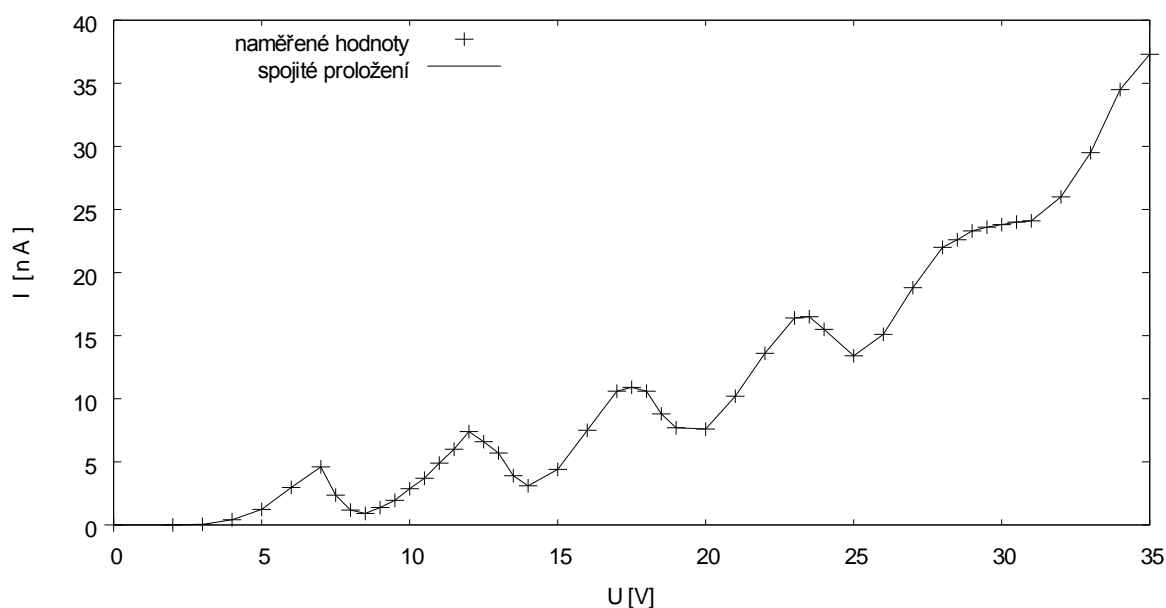
Z Grafu II lze určit hodnotu napětí, při které začíná docházet na parách rtuti k ionizaci - $U_{i0}=14V$. Toto napětí je ale hledané ionizační napětí plus kontaktní potenciál.

Nakonec jsme zvýšili teplotu v trubici na teplotu 150-200°C. Tato hodnota teploty odpovídá napětí na termočláncu $U=8,9mV$. Při této teplotě jsme měřili rezonanční potenciál. Výsledky jsou zaneseny do Tabulky III a Grafu III.

Tabulka III – V-A charakteristika při teplotě $t=(150-200)^{\circ}C$

U [V]	-I [nA]	σ_I [nA]	U [V]	-I [nA]	σ_I [nA]
0	0	0	17,5	10,9	0,3
2	0,0006	0,0001	18	10,6	0,1
3	0,045	0,001	18,5	8,8	0,1
4	0,41	0,01	19	7,7	0,1
5	1,23	0,02	20	7,6	0,2
6	2,97	0,05	21	10,2	0,3
7	4,6	0,1	22	13,6	0,3
7,5	2,36	0,05	23	16,4	0,3
8	1,18	0,05	23,5	16,5	0,2
8,5	0,91	0,01	24	15,5	0,2
9	1,38	0,02	25	13,4	0,2
9,5	1,95	0,03	26	15,1	0,2
10	2,87	0,03	27	18,8	0,3
10,5	3,7	0,1	28	22	0,3
11	4,9	0,1	28,5	22,6	0,6
11,5	6	0,1	29	23,3	0,5
12	7,4	0,1	29,5	23,6	0,7
12,5	6,6	0,1	30	23,8	0,5
13	5,7	0,1	30,5	24	0,2
13,5	3,9	0,1	31	24,1	0,2
14	3,1	0,1	32	26	0,2
15	4,4	0,1	33	29,5	0,3
16	7,5	0,1	34	34,5	0,3
17	10,6	0,1	35	37,3	0,5

Graf III - Určení rezonančního potenciálu



Z Grafu III jsem určila napětí, při kterých mají elektrony energii rovnou celistvému násobku energie excitační. Tato místa se vyznačují prudkým poklesem V-A charakteristiky. Určila jsem je vždy uprostřed mezi maximem a minimem závislosti, jsou dále zapsány v Tabulce IV.

Tabulka IV – Rezonanční potenciál rtuti v různých řádech

k	U [V]
1	7,75
2	13,0
3	18,6
4	24,2

První pokles proudu je od nulového napětí vzdálen o velikost rezonančního potenciálu U_r plus velikost kontaktního potenciálu K mezi katodou a urychlující elektrodou. Hodnoty rezonančního a kontaktního napětí jsem určila pomocí lineární regrese dat podle rovnice:

$$U = k \cdot U_r + U_k$$

$$U_r = (5,49 \pm 0,06) \text{ V}$$

$$K = (2,17 \pm 0,16) \text{ V}$$

Chyba uvedená u vypočtených hodnot potenciálů je pouze chybou lineární regrese. Chybu celkovou musím navýšit. Hodnoty napětí, při kterých nastává rezonance, jsou určeny pouze odečtením z grafu a mohlo přitom dojít k systematické chybě. Proto celkovou chybu odhaduji $\sigma_{U_r} = \sigma_K = 0,3 \text{ V}$.

Pokud známe kontaktní potenciál K , můžeme již upravit hodnotu změřeného ionizačního napětí. Z Grafu II jsem odečetla hodnotu napětí, při kterém začíná docházet k ionizaci jako $U_{i0} = 14 \text{ V}$. Pro toto napětí platí: $U_{i0} = U_r + K$.

$$U_i = (12 \pm 1) \text{ V}$$

Ze vztahu (3) jsem určila vlnovou délku λ odpovídající rezonanci.

$$\lambda = (226 \pm 12) \text{ nm}$$

Diskuze

Při pokojové teplotě je koncentrace rtuťových par malá a střední volná dráha elektronu je delší než délka trubice. Proto V-A charakteristika odpovídá charakteristice vakuové diody, jak je vidět z Grafu I.

Při určování ionizačního potenciálu jsme splnili podmínku zvýšení brzdného napětí i zvýšení teploty, u měření rezonančního potenciálu byla také teplota na správné hodnotě.

Jednoduchým odečítáním z grafů patrně vnášíme do výsledku největší chybu. Chyby fitu jsou malé, kolem 1%. Avšak musíme k tomu připočíst možnou systematickou chybu při odečítání z grafu. Tu odhaduji u rezonančního a kontaktního potenciálu na $\sigma_{U_r} = \sigma_K = 0,3V$. Chyba kontaktního potenciálu se dále přenesse na potenciál ionizační, potom tedy $\sigma_{U_i} = 1V$. Chyby určení proudu, které uvádím v Tabulkách I-III na výsledek nemají žádný výraznější vliv, protože důležitý je hlavně tvar křivek a hodnoty napětí, při kterých dochází ke zlomům ve V-A charakteristikách. Absolutní hodnoty proudu nás v tomto experimentu nezajímají.

Závěr

Naměřili jsme volt-ampérovou charakteristiku Franck-Hertzovy trubice s kapkou rtuti při pokojové teplotě. Je zanesena v Tabulce I a Grafu I.

Určili jsme hodnotu kontaktního potenciálu mezi katodou a urychlovací elektrodou trubice:

$$K = (2,2 \pm 0,3) V$$

Určili jsme rezonanční potenciál atomů rtuti:

$$U_r = (5,5 \pm 0,3) V$$

a ionizační potenciál atomů rtuti:

$$U_i = (12 \pm 1) V$$

Vlnová délka odpovídající rezonančnímu potenciálu je:

$$\lambda = (226 \pm 12) nm$$

Použitá literatura

[1] <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/416.htm> - Studijní text k úloze