

1. Zadání

1. 1. 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 (kolem $-1,5$ 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 pomocí osciloskopu změny, ke kterým dochází, a kvalitativně je popište. Proud trubicí udržujte v dovořených mezích (do 30 nA) vhodnou volbou předpětí první mřížky (v rozmezí od $-1,5$ do $+1$ 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.

2. Teoretický úvod¹

2. 1. Kvantová teorie stavby atomu

Podle kvantové teorie mohou elektrony v atomech existovat pouze v určitých stacionárních stavech s diskrétními hodnotami vazebné energie (tzv. energetické hladiny). Stav s nejnižší energií nazýváme základním stavem.

Při přechodu elektronu mezi hladinami, jejichž energetický rozdíl je ΔE , se vyžáří nebo pohltí foton o vlnové délce λ a platí vztah:

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

kde $h = 6,026 \cdot 10^{-34}$ Js je Planckova konstanta, $c = 3 \cdot 10^8$ ms⁻¹ rychlost světla a ν frekvence záření.

K přechodu elektronu v atomu na vyšší hladinu (excitace) je zapotřebí vnějšího působení. Tím může být například srážka atomu s elektronem urychleným napětím U , pro jehož energii E_k platí:

$$E_k = eU, \quad (2)$$

kde $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C je náboj elektronu.

Podle napětí U urychleného elektronu můžeme rozlišit následující případy:

- Pružné srážky elektronu s atomem: Elektron neztrácí žádnou energii, neboť je napětí U tak malé, že energie E_k nemůže způsobit excitaci.
- Nepružné srážky elektronu s atomem: Energie E_k byla dostatečná k přechodu elektronu v atomu na vyšší energetickou hladinu. Nalétávající elektron tak ztratil část své energie. V krajním případě, je veškerá energie E_k spotřebovaná na excitaci. Urychlující napětí pak nazýváme rezonančním potenciálem U_{rn} (n značí, o kolik energetických hladin elektron v atomu přeskočil) a dle (1) a (2) platí:

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

- Ionizace atomu: Energie E_k byla dostatečně velká k tomu, aby elektron vyrazila ven z atomu (z neutrálního atomu se tedy stává iont). Potřebné urychlující napětí nazýváme ionizačním potenciálem U_i a platí:

$$\lambda_{\infty} = \frac{hc}{eU_i} \quad (4)$$

¹ Napsáno na základě [1]

2. 2. Experimentální uspořádání

Měření bude prováděno podle schématu na *Obr. 1*.

Elektronka (opatřená mřížkami G_1 a G_2) je s kapkou rtuti umístěna v peci.

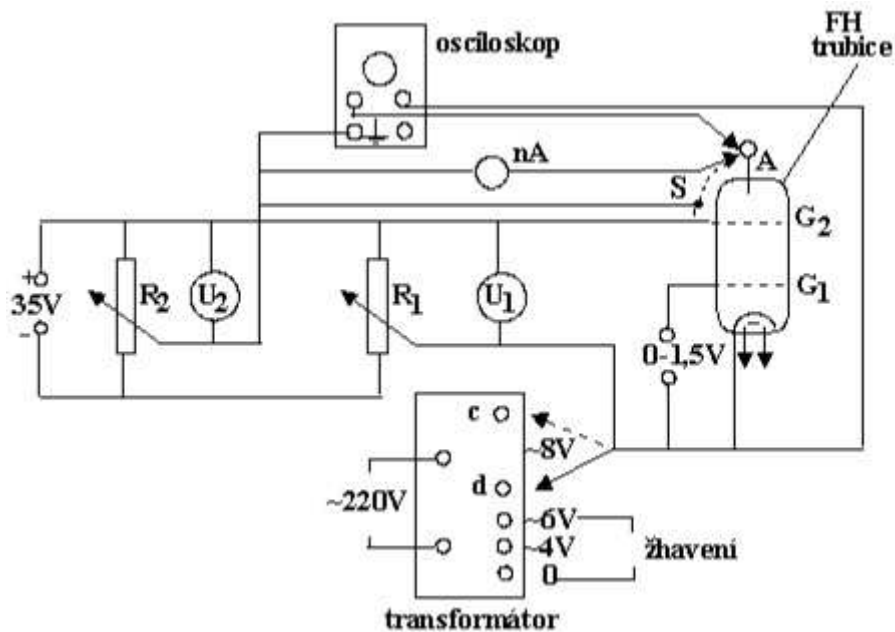
Při zvyšování teploty v peci roste tlak rtuťových par a tím se zvýší četnost srážek mezi volnými elektrony a atomy rtuti.

Napětí U_1 mezi mřížkou G_2 a katodou je urychlující napětí. Napětí U_{G_2-A} mezi mřížkou G_2 a anodou vytváří brzdné pole. Napětí U_{G_1-K} mezi mřížkou G_1 a katodou slouží k nastavování velikosti proudu elektronů bez měnění žhavení katody.

Při nastavení velké teploty v pídce (každý elektron se mnohokrát srazí s atomy rtuti) a malého brzdného napětí U_{G_2-A} můžeme změřit rezonanční potenciál. Se zvyšujícím urychlujícím napětím U_1 bude anodový proud I_a nejprve vzrůstat jako u vakuové diody. Dosáhne-li napětí U_1 velikosti rezonančního potenciálu U_{rm} , energie elektronů budou použity na excitaci atomů rtuti a nastane pokles proudu.

Nastavíme-li nižší teplotu (elektrony nebudou ztrácet tolik energie excitací atomů rtuti) a velké brzdné napětí U_{G_2-A} , můžeme změřit ionizační potenciál. Díky velkému brzdnému napětí nemohou emitované elektrony dosáhnout anody. Anodový proud I_a začne vzrůstat až při urychlujícím napětí větším než je ionizační potenciál U_i , kdy v okolí mřížky vznikají ionty, které po urychlení napětím U_{G_2-A} dopadají na anodu.

K poli mezi katodou a mřížkou přispívá také kontaktní rozdíl potenciálů U_k který je roven rozdílu výstupních prací mřížky a katody. Všechny závislosti anodového proudu I_a na napětí U_1 jsou tedy posunuty podél osy napětí o hodnotu U_k .



Obr. 1: Schéma zapojení pro měření rezonančního a ionizačního potenciálu rtuti

3. Výsledky měření

3. 1. Přístroje a chyby

Měřili jsme vždy závislost anodového proudu I_a na napětí U_I urychlujícím elektrony.

Napětí bylo měřeno přístrojem s automatickou volbou rozsahu. Byly použity rozsahy 100 mV, 10 V a 100 V. Měřeno bylo s přesností na 5 platných cifer. Jelikož ale zdaleka takovou přesnost nepotřebujeme, uvádíme naměřené hodnoty zaokrouhlené na desetiny.

Proud byl měřen nanoampérmetrem Keithley 6487 při rozsahu 200 nA. Při tomto rozsahu by chyba měla dle [2] být 0,15% z naměřené hodnoty + 10 pA. Hodnoty na displeji však hodně oscilovali. Na základě těchto oscilací jsme chybu odhadli na 0,8% z naměřené hodnoty.

3. 2. Měření při pokojové teplotě

Napětí mezi mřížkou G_I a katodou jsme nastavili na $U_{G1-K} = -1,039$ V při rozsahu měřicího přístroje 20 V a brzdné napětí na $U_{G2-A} = -1,54$ V při rozsahu 2 V.

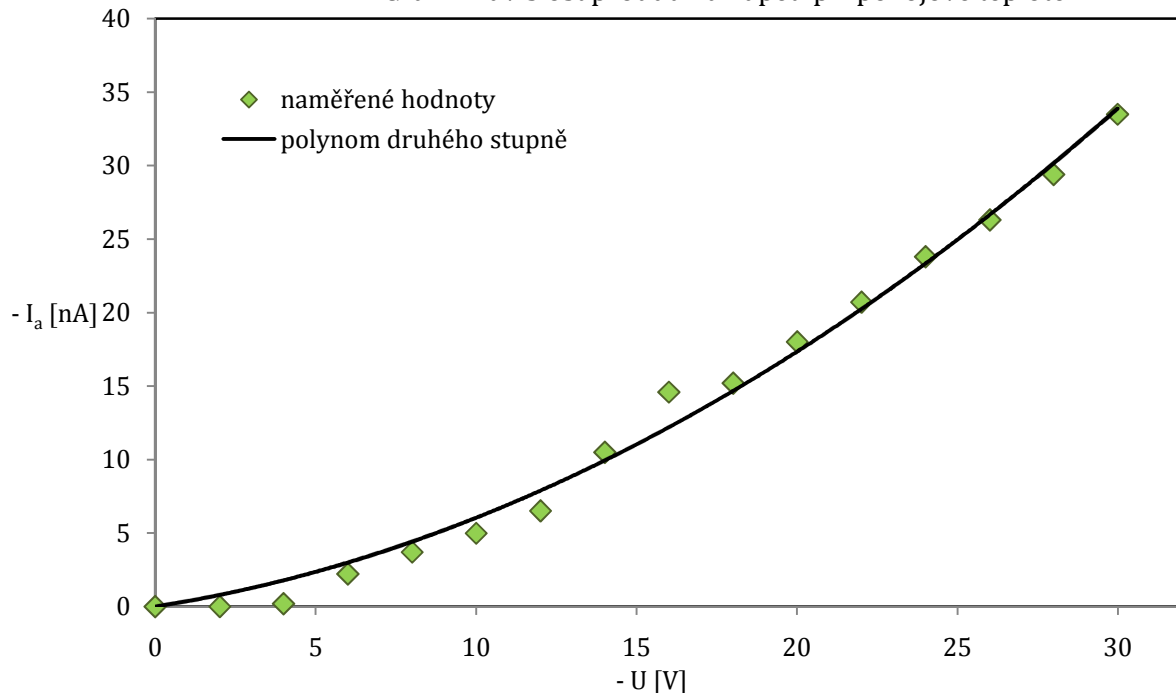
Naměřené hodnoty závislosti anodového proudu I_a na napětí U_I jsou uvedeny v *Tab. 1* a vyneseny do *Grafu 1* proloženého polynomem druhého stupně o rovnici

$$I_a[\text{nA}] = 0,021(U_1[\text{V}])^2 + 0,341U_1[\text{V}].$$

- U_1 [V]	- I_a [nA]	- U_1 [V]	- I_a [nA]
0,0	0,001	16,0	14,6
2,0	0,002	18,0	15,2
4,0	0,186	20,0	18,0
6,0	2,22	22,0	20,7
8,0	3,71	24,0	23,8
10,0	4,99	26,0	26,3
12,0	6,51	28,0	29,4
14,0	10,5	30,0	33,5

Tab. 1: Naměřené hodnoty anodového proudu v závislosti na urychlujícím napětí při pokojové teplotě

Graf 1: Závislost proudu na napětí při pokojové teplotě



3. 3. Ohřev trubice

Pro další měření jsme potřebovali zvětšit teplotu v pícce.

První ohřev na teplotní rozdíl 82°C (oproti pokojové teplotě) jsme prováděli při napětích $U_{G1-K} = -0,539\text{ V}$ (rozsah 2 V), $U_{G2-A} = -30,0\text{ V}$ (rozsah 200 V) a $U_1 = -16,472\text{ V}$ (rozsah 100 V). Na osciloskopu jsme pozorovali, jak se proud tvořený volnými elektrony mění na ionizační proud tvořený kladnými ionty rtuť.

Druhý ohřev na teplotní rozdíl 210°C jsme prováděli při napětích $U_{G1-K} = -0,916\text{ V}$ až $U_{G1-K} = +0,109\text{ V}$ (rozsah 2 V), $U_{G2-A} = -1,51\text{ V}$ (rozsah 20 V) a $U_1 = -14,457\text{ V}$ (rozsah 100 V). Na osciloskopu jsme pozorovali vytváření „schodů“ a později „zubů“ na křivce závislosti proudu na napětí. Tyto poklesy proudu odpovídají rezonančním potenciálům, při kterých je energie volných elektronů využívána na excitaci atomů rtuť.

3. 4. Měření při teplotním rozdílu 210°C a výpočet rezonančního potenciálu

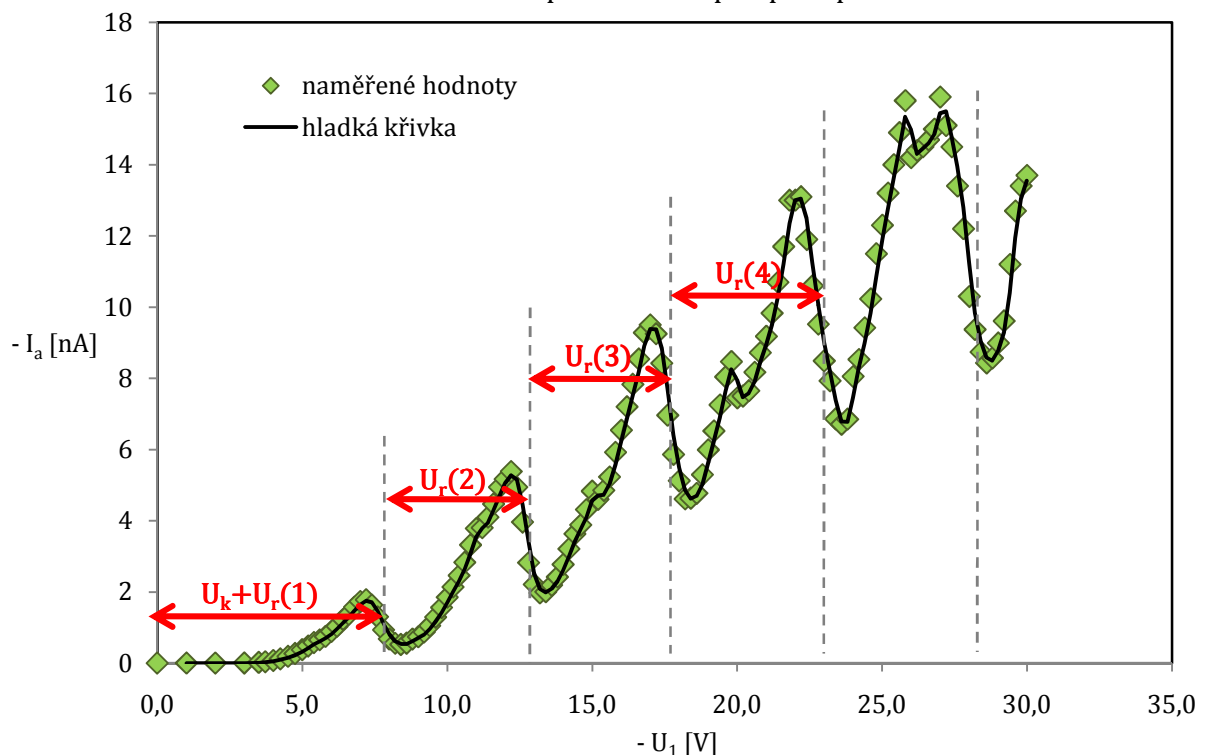
Napětí mezi mřížkou G_1 a katodou jsme nastavili na $U_{G1-K} = 0,109\text{ V}$ při rozsahu měřicího přístroje 2 V a brzdné napětí na $U_{G2-A} = -1,68\text{ V}$ při rozsahu 20 V .

Naměřené hodnoty závislosti anodového proudu I_a na napětí U_1 jsou uvedeny v *Tab. 2* a vyneseny do *Grafu 2* a proložené hladkou křivkou.

V *Grafu 2* jsou vyznačeny intervaly napětí použité pro výpočet rezonančního potenciálu U_r a kontaktního rozdílu potenciálů U_k . Z hodnot v *Tab. 2* jsme určili hodnoty $U_k + \sum_{N=1}^n U_r(N)$ pro $n = 1$ až 4 (tedy hodnoty rezonančních potenciálů posunutě o U_k) s chybou $0,1\text{ V}$. Tyto hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 3*. Dále předpokládáme, že n -tý rezonanční potenciál U_{rn} můžeme z prvního rezonančního potenciálu U_r vypočítat jako $U_{rn} = nU_r$. Kontaktní rozdílu potenciálů a první rezonanční potenciál jsme proto určili lineární regresí závislosti veličiny $U_k + \sum_{N=1}^n U_r(N)$ na n , která má tvar: $U_k + \sum_{N=1}^n U_r(N) = U_k + nU_r$.

Výsledek: $U_r = (4,9 \pm 0,1)\text{V}$, $U_k = (2,9 \pm 0,1)\text{V}$. Chyby jsou určeny součtem relativní statistické chyby a maximální relativní chyby veličiny $U_k + \sum_{N=1}^n U_r(N)$. Pro porovnání jsou v *Tab. 3* uvedeny hodnoty rezonančních potenciálů posunutě o hodnotu kontaktního rozdílu potenciálů přepočtené jako $U_k + U_{rn} = U_k + nU_r$. Chyby jsou spočteny metodou přenosu chyb dle [3].

Graf 2: Závislost proudu na napětí při teplotě 210°C



- U ₁ [V]	- I _a [nA]	- U ₁ [V]	- I _a [nA]	- U ₁ [V]	- I _a [nA]	- U ₁ [V]	- I _a [nA]	- U ₁ [V]	- I _a [nA]
0,0	0,000	8,6	0,560	14,0	2,77	19,4	7,25	24,8	11,5
1,0	0,001	8,8	0,679	14,2	3,21	19,6	8,04	25,0	12,3
2,0	0,002	9,0	0,738	14,4	3,63	19,8	8,47	25,2	13,2
3,0	0,004	9,2	0,872	14,6	3,88	20,0	7,45	25,4	14,0
3,5	0,019	9,4	1,050	14,8	4,31	20,2	7,50	25,6	14,9
3,7	0,038	9,6	1,29	15,0	4,83	20,4	7,65	25,8	15,8
4,0	0,072	9,8	1,56	15,2	4,60	20,6	8,17	26,0	14,2
4,2	0,118	10,0	1,85	15,4	4,85	20,8	8,72	26,2	14,4
4,5	0,187	10,2	2,14	15,6	5,23	21,0	9,18	26,4	14,5
4,8	0,269	10,4	2,46	15,8	5,92	21,2	9,83	26,6	14,7
5,0	0,375	10,6	2,83	16,0	6,54	21,4	10,7	26,8	15,0
5,2	0,480	10,8	3,32	16,2	7,20	21,6	11,7	27,0	15,9
5,4	0,578	11,0	3,78	16,4	7,83	21,8	13,0	27,2	15,1
5,6	0,653	11,2	3,80	16,6	8,54	22,0	13,0	27,4	14,5
5,8	0,745	11,4	4,10	16,8	9,28	22,2	13,1	27,6	13,4
6,0	0,892	11,6	4,47	17,0	9,50	22,4	11,9	27,8	12,2
6,2	1,036	11,8	4,94	17,2	9,25	22,6	10,6	28,0	10,3
6,4	1,23	12,0	5,17	17,4	8,42	22,8	9,52	28,2	9,37
6,6	1,37	12,2	5,38	17,6	6,96	23,0	8,49	28,4	8,74
6,8	1,57	12,4	4,94	17,8	5,86	23,2	7,93	28,6	8,43
7,0	1,73	12,6	3,96	18,0	5,12	23,4	6,86	28,8	8,57
7,2	1,78	12,8	2,82	18,2	4,61	23,6	6,71	29,0	8,99
7,4	1,63	13,0	2,21	18,4	4,63	23,8	6,85	29,2	9,61
7,6	1,30	13,2	1,97	18,6	4,77	24,0	8,05	29,4	11,2
7,8	0,935	13,4	2,00	18,8	5,29	24,2	8,53	29,6	12,7
8,0	0,677	13,6	2,19	19,0	5,99	24,4	9,42	29,8	13,4
8,2	0,554	13,8	2,42	19,2	6,52	24,6	10,23	30,0	13,7
8,4	0,523								

Tab. 2: Naměřené hodnoty anodového proudu v závislosti na urychlujícím napětí při teplotním rozdílu 210°C

n	$U_k + \sum_{N=1}^n U_r(N)$ [V]	$U_k + U_{rn}$ [V]
1	$7,8 \pm 0,1$	$7,8 \pm 0,2$
2	$12,6 \pm 0,1$	$12,6 \pm 0,2$
3	$17,4 \pm 0,1$	$17,5 \pm 0,3$
4	$22,4 \pm 0,1$	$22,3 \pm 0,4$

Tab. 3: Výpočet rezonančních potenciálů a kontaktního rozdílu potenciálů
Vlnovou délku rezonančního přechodu spočteme dosazením U_r do vztahu (3) a chybu určíme metodou přenosu chyb dle [3]: $\lambda = (255 \pm 5)\text{nm}$.

3. 5. Měření při teplotním rozdílu 82°C a výpočet ionizačního potenciálu

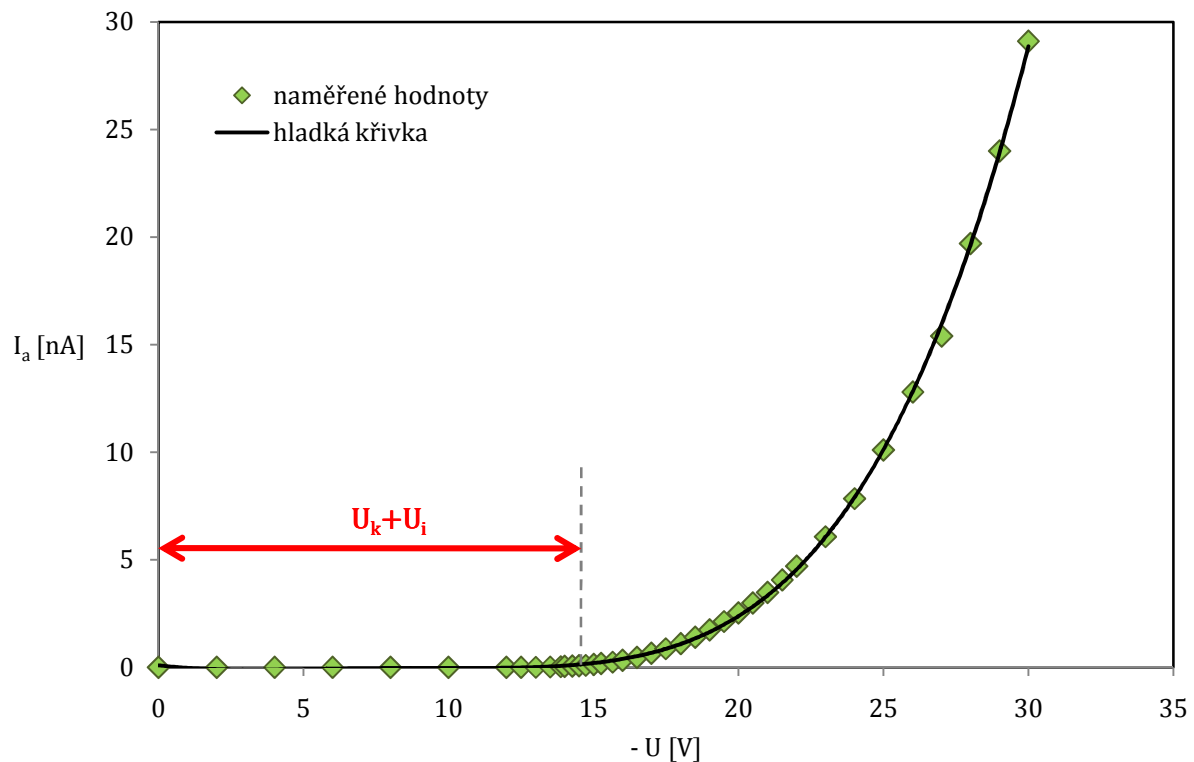
Napětí mezi mřížkou G_1 a katodou jsme nastavili na $U_{G_1-K} = -0,696$ V při rozsahu měřicího přístroje 2 V a brzdné napětí na $U_{G_2-A} = -29,9$ V při rozsahu 200 V.

Naměřené hodnoty závislosti anodového proudu I_a na napětí U_1 jsou uvedeny v *Tab. 4* a vyneseny do *Grafu 3* proložené hladkou křivkou.

$-U_1$ [V]	I_a [nA]	$-U_1$ [V]	I_a [nA]	$-U_1$ [V]	I_a [nA]	$-U_1$ [V]	I_a [nA]
0,0	0,000	13,9	0,039	17,0	0,655	22,0	4,70
2,0	0,000	14,0	0,046	17,5	0,873	23,0	6,08
4,0	0,000	14,3	0,063	18,0	1,103	24,0	7,85
6,0	0,000	14,5	0,080	18,5	1,41	25,0	10,1
8,0	0,000	14,7	0,102	19,0	1,75	26,0	12,8
10,0	0,000	15,0	0,133	19,5	2,14	27,0	15,4
12,0	0,002	15,3	0,178	20,0	2,54	28,0	19,7
12,5	0,005	15,7	0,251	20,5	2,99	29,0	24,0
13,0	0,012	16,0	0,333	21,0	3,48	30,0	29,1
13,5	0,024	16,5	0,469	21,5	4,06		

Tab. 4: Naměřené hodnoty anodového proudu v závislosti na urychlujícím napětí při teplotním rozdílu 82°C

Graf 3: Závislost proudu na napětí při teplotě 82°C



Z *Tab. 4* jsme vyčetli hodnotu $U_k + U_i$ podle *Grafu 3* s chybou odhadovanou na 0,5 V: $U_k + U_i = (14,3 \pm 0,5)V$. Ionizační potenciál určíme odečtením kontaktního rozdílu potenciálů U_k vypočteného v 3. 4. a chybu spočítáme metodou přenosu chyb dle [3]: $U_i = (11,4 \pm 0,5)$ V.

4. Diskuse výsledků

Dle 2. 2. roste četnost srážek volných elektronů s atomy rtuti s teplotou. Těmito srážkami (nejsou-li pružné) ztrácí elektrony energii, která se spotřebovává na excitaci atomu. Ionizační potenciál měříme při velkém brzděném napětí, které emitované elektrony nedokážou překonat. Potřebujeme proto, aby srážek způsobujících excitaci bylo co nejméně a energie elektronů se využívala k ionizaci atomů, které po urychlení napětím U_{G2-A} dopadají na anodu. Z toho důvodu jsme měření ionizačního potenciálu prováděli při nižší teplotě než měření rezonančních potenciálů.

Při ohřevu pícky jsme na osciloskopu pozorovaly jevy popsané v 3. 3. Tyto jevy odpovídají teorii uvedené v 2. 2. (která vychází z jevů při srážkách popsáných v 2. 1.). S teorií se shodují také grafy naměřených charakteristik (Viz Graf 1 – 3). Zajímavá je charakteristika při pokojové teplotě, která se dala dobře proložit polynomem druhého stupně.

Celkovým problémem při měření charakteristik bylo odečítání anodového proudu. Hodnoty na displeji nanoampérmetru silně oscilovali (a to i při zapnutém středování). Chybu naměřených hodnot jsme odhadli na 0,8%. Měření napětí byly oproti tomu dostatečně přesné (respektive další chyby vzniklé odečítáním z grafů jsou podstatně větší).

U určení rezonančního proudu jsme postupovali tak, že jsme předpokládali periodičnost rezonančních potenciálů, totiž že $U_{rn} = nU_r$. Z Grafu 2 a 3. sloupce Tab. 3 můžeme říct, že byl předpoklad v pořádku. Díky tomu se také přibližně shodují 2. a 4. sloupečky této tabulky.

U určování ionizačního proudu bylo problematické určit, ve které části charakteristiky (viz Graf 3) se již proud projevuje. Dle [1] k proudu I_a přispívá proud fotoelektronů uvolněných z povrchu anody elektromagnetickým zářením. Elektrony provádějící ionizaci jsou brzděny napětím U_{G2-A} , které proniká do okolí mřížky. Problémem jsou také různé počáteční rychlosti emitovaných elektronů. Díky tomu jsme zvolili větší chybu ionizačního proudu.

Dle [4] je ionizační potenciál rtuti $U_i \doteq 10$ V. Naměřená hodnota je o něco vyšší. To je pravděpodobně zapříčiněno jeho chybným odečtením z Grafu 3.

5. Závěr

Změřili jsme charakteristiky Franck-Hertzovy trubice s parami rtuti při pokojové teplotě a při teplotních rozdílech 82°C a 210°C oproti pokojové teplotě. Příslušné závislosti anodového napětí U_a na napětí U_1 urychlujícím elektrony jsou znázorněny v Grafech 1 – 3.

V průběhu ohřívání trubice na vyšší teploty jsme pomocí osciloskopu pozorovali změny, ke kterým docházelo. Tyto změny jsou popsány v 3. 3. a odpovídají teorii popsané v odstavci 2.

Z naměřených závislostí jsme určili kontaktní rozdíl potenciálů $U_k = (2,9 \pm 0,1)$ V, první rezonanční potenciál $U_r = (4,9 \pm 0,1)$ V a ionizační potenciál $U_i = (11,4 \pm 0,5)$ V. Spočetli jsme vlnovou délku odpovídající rezonančnímu přechodu: $\lambda = (255 \pm 5)$ nm.

6. Seznam použité literatury

- [1] Vorobel V.: Studium plynových detektorů,
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_402.pdf (2013)
- [2] <http://www.tevetllc.com/documents/pdf/keithley/manuals/6485-6487-m.pdf>
- [3] J. English: Základy zpracování fyzikálních měření, Praha 2006
- [4] Tables of Physical and Chemical Constants,
http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_6/4_6_3.html (2013)