

Ústav fyzikální elektroniky PŘF MU

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

Zpracoval: Artem Gorodilov

Naměřeno: 26. února 2024

Obor: Astrofyzika

Skupina: Po 14:00

Testováno:

Úloha č. C: Studium termoelektronové emise

1. Zadání

1. Změřit, jak se anodový proud mění v závislosti na anodovém napětí $I_a = f(U)$, kde U je v rozmezí od -5 V do 500 V, pro dvě hodnoty žhavicího proudu I_f . Výsledné závislosti zobrazit v grafu.

Zobrazit náběhovou oblast anodového proudu I_a v grafu s použitím souřadnic $\ln I_a = f(U_a)$ a určit teplotu elektronů.

Zpracovat oblast nasyceného anodového proudu $I_{nas} = f(U)$ pro $U < 500$ V do grafu v souřadnicích $\ln I_{nas} = \sqrt{U_a}$ a určit přírůstek proudu způsobený Schottkyho efektem.

2. Určit anodové napětí U_a , při kterém je anodový proud nasycený, tj. $I_a = I_{nas}$.
3. Měřením závislosti nasyceného anodového proudu na žhavicím proudu $I_{nas} = f(I_f)$ určit výstupní práci wolframu w pomocí Richardsonovy-Dushmanovy rovnice.

$$I_{nas} = BT^2 \exp\left(-\frac{w}{kT}\right) \quad (1)$$

kde B je konstanta zahrnující plochu katody a termoemisní konstantu a k je Boltzmannova konstanta. Po logaritmování a úpravě dostáváme vztah pro Richardsonovu-Dushmanovu přímku:

$$y = -\frac{w}{k}x + \ln B \quad (2)$$

kde $y = \ln(I_{nas}/T^2)$ a $x = 1/T$.

Teplotu vlákna určíme z měření žhavicího proudu I_f a napětí U_f :

$$R_t = \frac{U_f}{I_f} = \frac{\rho d}{S}(1 + \alpha t) \quad (3)$$

kde R_t je odpor vlákna při teplotě t , ρ je hustota materiálu, d je průměr vlákna, S je jeho plocha a α je teplotní součinitel odporu.

Zajímavostí je, že při snižování anodového napětí se elektrony stávají více brzděny elektrickým polem.

2. Teorie

2.1. Termoelektronová emise

Experiment se zabývá uvolňováním elektronů z kovových povrchů, které je vyvoláno jejich zahřátím na vysokou teplotu. Tento jev, známý jako termoemise, nám umožňuje získat informace o vazebných silách, kterými jsou elektrony drženy v kovech.

Když je kov zahřát na dostatečně vysokou teplotu, začne emitovat elektrony. Avšak, aby mohly elektrony opustit povrch kovu, musí mít jejich energie vyšší hodnotu než je tzv. výstupní práce kovu w . Celkový proud elektronů uvolněných z kovu při teplotě T a s výstupní prací w je popsán jako nasycený emisní proud:

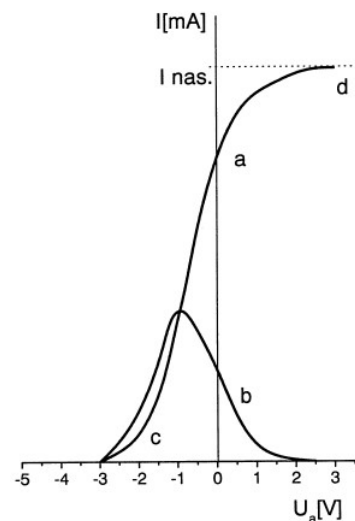


Figure (1) a - integrální, b - diferenciální tvar rozdělení energie elektronů. Oblast c je oblast nábojového proudu, oblast d je oblast saturačního proudu.

Pro naběhovou oblast platí, že anodový proud I_a je exponenciálně závislý na anodovém napětí U_a a teplotě emitovaných elektronů T_e :

$$I_a = I_0 \exp\left(\frac{eU_a}{kT_e}\right) \quad (4)$$

2.2. Schottkyho efekt

Pokud se katoda nachází v silném elektrickém poli, dochází ke snížení výstupní práce katody, což můžeme popsat následujícím vztahem:

$$w_p = \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}} \quad (5)$$

kde e je náboj elektronu, ϵ_0 je permitivita vakua a E je intenzita elektrického pole u povrchu katody. A tedy nová hodnota w_p výstupní práce bude:

$$w = w - w_p = w - \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}} \quad (6)$$

Schottkyho efekt je schematicky znázorněn na obrázku (2).

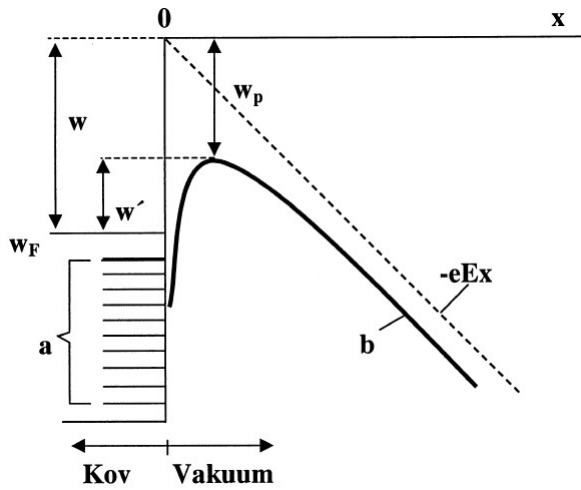


Figure (2) Schottkyho efekt.

Nasyčený anodový proud pak bude záviset na intenzitě elektrického pole u povrchu katody a výstupní práci:

$$\ln I'_{nas} = \ln I_{nas} + \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon_0 k^2 T^2}} \sqrt{E} \quad (7)$$

Intenzitu elektrického pole u žhavené katody lze určit ze vztahu:

$$E = U_a \frac{L - D}{D} \frac{1}{r \ln(R/r)} \quad (8)$$

kde L , D , R a r jsou geometrické parametry katody a anody, specifické pro použité zařízení.

3. Měření

Experiment provádíme s poloautomatickým nastavením, kde jsou všechna napětí a měřicí zařízení připojena k počítači, což nám umožňuje okamžité grafické znázorňování získaných dat.

Tímto způsobem můžeme ihned po zaznamenání dat identifikovat oblast naběhového proudu.

Za tímto účelem zjistíme závislost $\ln I_a = f(U_a)$ o případech dvou $I_f = 1.8$ A a $I_f = 1.9$ A. Poté získané údaje vyneseme do grafu a provedeme lineární fitování oblasti naběhového proudu. Poté ze vzorce (3) určíme teplotu emitovaných elektronů T pomocí získané směrnice přímky α jako $T = \frac{e}{k\alpha}$. Výsledky jsou znázorněny na obrázku (3).

Z toho dostáváme následující teploty emitovaných elektronů:

$$T_{1.8} = (4080 \pm 340) \text{ K} \quad \text{a} \quad T_{1.9} = (4650 \pm 320) \text{ K}$$

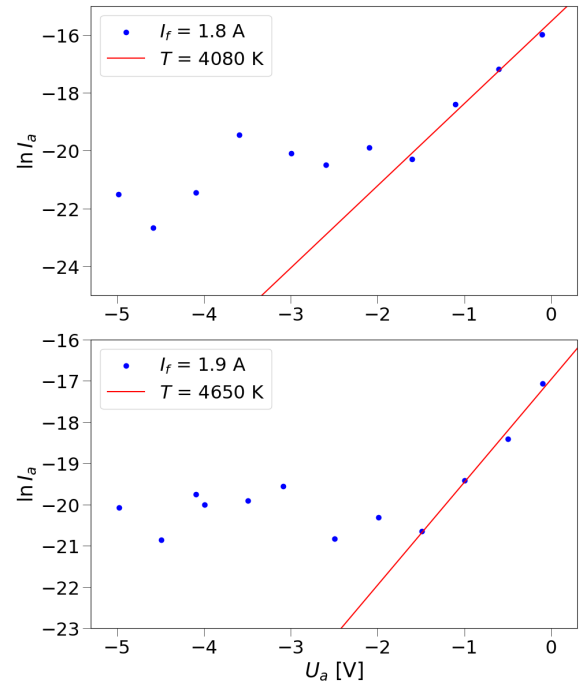


Figure (3) Závislost $\ln I_a = f(U_a)$ pro $I_f = 1.8$ A a $I_f = 1.9$ A.

Dále uvažujeme oblast nasyčeného proudu.

Nejprve zjistíme závislost $\ln I_{nas} = \sqrt{U_a}$ a vykreslíme data. Data jsou znázorněna na obrázku (4).

Poté z grafu ručně určíme hodnotu přírůstku proudu. Získáme následující naměřené hodnoty:

$$\Delta I_{nas,1.8} = 4.75(1) \mu\text{A}$$

$$\Delta I_{nas,1.9} = 13.36(1) \mu\text{A}$$

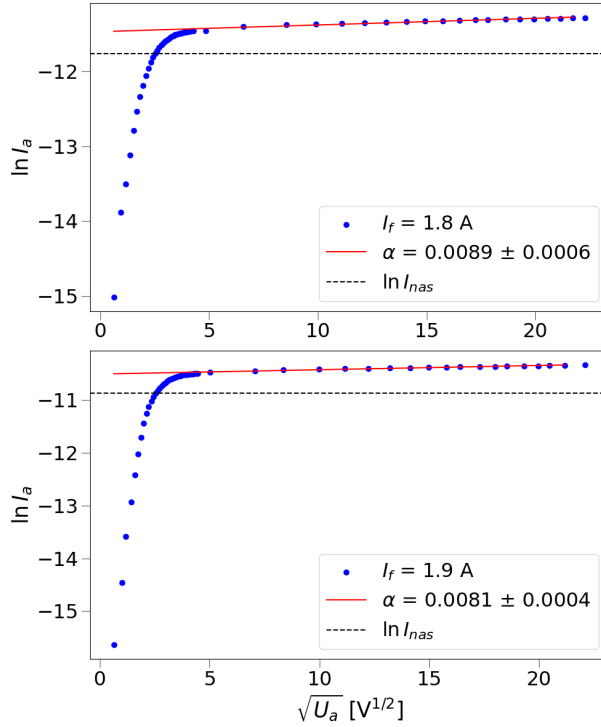


Figure (4) Závislost $\ln I_{nas} = \sqrt{U_a}$ pro $I_f = 1.8$ A a $I_f = 1.9$ A.

Podle vzorce (7) určete intenzitu elektrického pole v blízkosti katody pro anodové napětí při kterém je anodový proud nasycený:

$$U_{a,1.8} = 6.4 \text{ V} \quad \text{a} \quad U_{a,1.9} = 6.48 \text{ V}$$

$$E = 1.25 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

Podle vzorce (6) tedy zjistíme teoretickou hodnotu přírůstku proudu:

$$\Delta I_{nas,teor,1.8} = 8.80(9) \text{ } \mu\text{A}$$

$$\Delta I_{nas,teor,1.9} = 21.1(2) \text{ } \mu\text{A}$$

Dále změříme závislost nasyceného anodového proudu na žhavicím proudu $I_{nas} = f(I_f)$ pro napětí $U_a = 19.95$ V.

Pomocí vzorce (3) určíme teplotu vlákna t . Poté vypočteme závislost $\ln(I_{nas}/T^2) = f(1/T)$ a vyneseme data do grafu. Data jsou znázorněna na obrázku (5).

Z lineárního fitování získáme hodnotu výstupní práce w wolframu a konstantu zahrnující plochu katody a termoemisní konstantu B :

$$w = 3.55(6) \text{ eV}$$

$$B = 1.1(6) \cdot 10^6 \text{ A/K}^{-2}$$

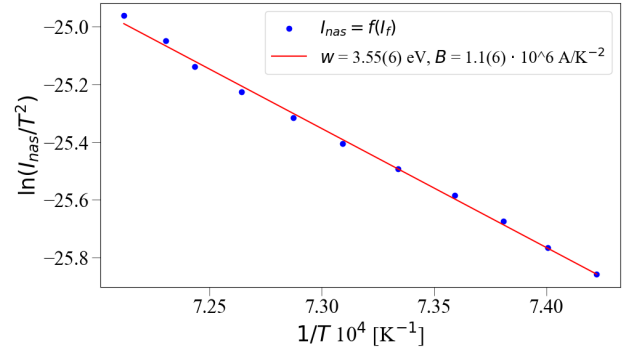


Figure (5) Závislost $\ln(I_{nas}/T^2) = f(1/T)$ pro $U_a = 19.95$ V. R-D křivka.

Tabulkové hodnoty použité při výpočtu:

$$\begin{array}{ll} e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} & k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \\ \epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} & \rho = 4.89 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m} \\ \alpha = 4.83 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} & r = 0.045 \text{ mm} \\ R = 17 \text{ mm} & L = 25 \text{ mm} \\ D = 15 \text{ mm} & d/s = 7.76 \cdot 10^6 \text{ m} \end{array}$$

Výsledky měření jsou v tabulce (1) a (2).

K výpočtu veličin a jejich nejistot byla použita knihovna Uncertainties pro Python:

pypi.org/project/uncertainties. Chyby byly rozšířeny o Studentův koeficient (2-Tail Confidence Level) s ohledem na stupně volnosti pro každou hodnotu, pro interval spolehlivosti 68.27%.

4. Závěr

Ze získaných dat jsme určili teplotu emitovaných elektronů $T_{1.8} = (4080 \pm 340) \text{ K}$ a $T_{1.9} = (4650 \pm 320) \text{ K}$ pro $I_f = 1.8$ A a $I_f = 1.9$ A resp. Vidíme, že teplota elektronů se zvyšuje s žhavicím proudem.

Dále jsme určili hodnotu přírůstku proudu pro napětí $U_a = 500$ V, které odpovídá intenzitě elektrického pole $E = 1.25 \cdot 10^6 \text{ V/m}$. Získané hodnoty $\Delta I_{nas,1.8} = 7.907(9) \text{ } \mu\text{A}$ a $\Delta I_{nas,1.9} = 19.22(1) \text{ } \mu\text{A}$. Vidíme, že naměřené hodnoty se liší od teoretických hodnot o 40% a 30% resp.

Anodové napětí, při kterém je anodový proud nasycený, jsme určili jako $U_{a,1.8} = 6.4$ V a $U_{a,1.9} = 6.48$ V.

Nakonec jsme určili výstupní práci wolframu $w = 3.55(6) \text{ eV}$ a konstantu zahrnující plochu katody a termoemisní konstantu $B = 1.1(6) \cdot 10^6 \text{ A/K}^{-2}$. Získaná hodnota výstupní práce se liší od tabulkové hodnoty $w_{tab} = 4.5 \text{ eV}$ o 21%. To bylo s největší pravděpodobností způsobeno tím, že jsme při měření I_f použili rozsah 1.8 A až 1.9 A. Hodnota výstupní práce by byla přesnější, kdybychom při měření použili větší interval proudu.

5. Přílohy

5.1. Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro $I_f = 1.8 \text{ A}$

$U_f[V]$	$I_f[A]$	$U_a[V]$	I_a	$\ln I_a$	$\sqrt{U_a}$	$U_f[V]$	$I_a[A]$	$U_a[V]$	I_a	$\ln I_a$	$\sqrt{U_a}$
4.259	1.805	10.37	9.646	-11.549	3.22	4.261	1.805	-6.58	0.001	-20.409	
4.259	1.805	10.87	9.766	-11.537	3.297	4.262	1.805	-5.986	0.0	-21.444	
4.259	1.805	11.37	9.878	-11.525	3.372	4.263	1.805	-5.578	0.0	-21.79	
4.259	1.805	11.87	10.035	-11.509	3.445	4.262	1.805	-4.987	0.0	-21.514	
4.26	1.805	12.268	10.063	-11.507	3.503	4.259	1.805	-4.585	0.0	-22.663	
4.26	1.805	12.86	10.132	-11.5	3.586	4.259	1.805	-4.09	0.0	-21.455	
4.26	1.805	13.36	10.19	-11.494	3.655	4.258	1.805	-3.592	0.004	-19.454	
4.26	1.805	13.86	10.246	-11.489	3.723	4.257	1.805	-2.993	0.002	-20.083	
4.26	1.805	14.36	10.301	-11.483	3.789	4.258	1.805	-2.595	0.001	-20.5	
4.26	1.805	14.86	10.345	-11.479	3.855	4.259	1.805	-2.094	0.002	-19.889	
4.26	1.805	15.36	10.383	-11.475	3.919	4.261	1.805	-1.6	0.002	-20.282	
4.26	1.805	15.86	10.421	-11.472	3.982	4.262	1.805	-1.104	0.01	-18.4	
4.261	1.805	16.36	10.454	-11.469	4.045	4.262	1.805	-0.606	0.035	-17.169	
4.262	1.805	16.852	10.482	-11.466	4.105	4.261	1.805	-0.107	0.116	-15.972	
4.262	1.805	17.35	10.513	-11.463	4.165	4.261	1.805	0.391	0.301	-15.015	0.625
4.261	1.805	17.85	10.54	-11.46	4.225	4.261	1.805	0.89	0.933	-13.885	0.943
4.261	1.805	18.35	10.575	-11.457	4.284	4.261	1.805	1.388	1.364	-13.505	1.178
4.251	1.805	23.51	10.525	-11.462	4.849	4.26	1.805	1.886	2.012	-13.116	1.373
4.25	1.805	43.422	11.169	-11.402	6.59	4.26	1.805	2.384	2.798	-12.787	1.544
4.25	1.805	73.3	11.427	-11.379	8.562	4.262	1.805	2.789	3.597	-12.535	1.67
4.251	1.805	98.2	11.57	-11.367	9.91	4.261	1.805	3.282	4.371	-12.34	1.812
4.251	1.805	123.1	11.69	-11.357	11.095	4.259	1.805	3.88	5.1	-12.186	1.97
4.25	1.805	148.0	11.785	-11.349	12.166	4.259	1.805	4.38	5.784	-12.06	2.093
4.251	1.805	172.96	11.868	-11.342	13.151	4.259	1.805	4.88	6.395	-11.96	2.209
4.251	1.805	197.9	11.94	-11.336	14.068	4.258	1.805	5.38	6.937	-11.879	2.319
4.25	1.805	222.76	12.008	-11.33	14.925	4.259	1.805	5.78	7.403	-11.814	2.404
4.25	1.805	247.7	12.07	-11.325	15.738	4.259	1.805	6.38	7.8	-11.761	2.526
4.25	1.805	272.6	12.128	-11.32	16.511	4.259	1.805	6.88	8.13	-11.72	2.623
4.249	1.805	297.5	12.186	-11.315	17.248	4.259	1.805	7.278	8.454	-11.681	2.698
4.249	1.805	317.42	12.238	-11.311	17.816	4.26	1.805	7.876	8.718	-11.65	2.806
4.249	1.805	347.3	12.288	-11.307	18.636	4.26	1.805	8.37	8.957	-11.623	2.893
4.249	1.805	372.2	12.335	-11.303	19.292	4.259	1.805	8.87	9.166	-11.6	2.978
4.249	1.805	397.1	12.379	-11.3	19.927	4.26	1.805	9.37	9.354	-11.58	3.061
4.249	1.805	422.4	12.423	-11.296	20.552	4.26	1.805	9.87	9.508	-11.563	3.142
4.249	1.805	447.4	12.467	-11.292	21.152	4.259	1.805	10.37	9.646	-11.549	3.22
4.249	1.805	472.4	12.512	-11.289	21.735	4.249	1.805	496.4	12.55	-11.286	22.28
4.249	1.805	496.4	12.55	-11.286	22.28						

5.2. Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro $I_f = 1.9 \text{ A}$

$U_f[V]$	$I_f[A]$	$U_a[V]$	I_a	$\ln I_a$	$\sqrt{U_a}$	$U_f[V]$	$I_f[A]$	$U_a[V]$	I_a	$\ln I_a$	$\sqrt{U_a}$
4.608	1.905	11.47	25.55	-10.575	3.387	4.625	1.905	-4.98	0.002	-20.077	
4.608	1.905	11.87	25.819	-10.564	3.445	4.627	1.905	-4.49	0.001	-20.851	
4.607	1.905	12.47	26.059	-10.555	3.531	4.624	1.905	-4.09	0.003	-19.75	
4.607	1.905	12.97	26.274	-10.547	3.601	4.624	1.905	-3.99	0.002	-20.001	
4.607	1.905	13.47	26.45	-10.54	3.67	4.626	1.905	-3.49	0.002	-19.912	
4.606	1.905	13.96	26.623	-10.534	3.736	4.626	1.905	-3.088	0.003	-19.554	
4.606	1.905	14.96	26.864	-10.525	3.868	4.626	1.905	-2.493	0.001	-20.831	
4.605	1.905	15.46	26.966	-10.521	3.932	4.627	1.905	-1.991	0.002	-20.307	
4.605	1.905	15.86	27.064	-10.517	3.982	4.626	1.905	-1.493	0.001	-20.647	
4.605	1.905	16.46	27.161	-10.514	4.057	4.626	1.905	-0.995	0.004	-19.421	
4.605	1.905	16.96	27.243	-10.511	4.118	4.627	1.905	-0.496	0.01	-18.407	
4.604	1.905	17.36	27.333	-10.507	4.167	4.625	1.905	-0.099	0.038	-17.075	
4.602	1.905	17.86	27.428	-10.504	4.226	4.625	1.905	0.397	0.161	-15.64	0.63
4.603	1.905	18.452	27.49	-10.502	4.296	4.624	1.905	0.994	0.526	-14.458	0.997
4.603	1.905	18.95	27.554	-10.499	4.353	4.623	1.905	1.393	1.252	-13.591	1.18
4.603	1.905	19.35	27.608	-10.497	4.399	4.624	1.905	1.991	2.41	-12.936	1.411
4.604	1.905	19.95	27.665	-10.495	4.467	4.623	1.905	2.489	4.026	-12.423	1.578
4.612	1.905	25.098	28.119	-10.479	5.01	4.624	1.905	2.988	6.024	-12.02	1.729
4.615	1.905	50.0	29.049	-10.447	7.071	4.623	1.905	3.486	8.209	-11.71	1.867
4.615	1.905	69.92	29.568	-10.429	8.362	4.622	1.905	3.889	10.706	-11.445	1.972
4.615	1.905	99.8	29.927	-10.417	9.99	4.619	1.905	4.486	12.961	-11.254	2.118
4.615	1.905	124.7	30.209	-10.407	11.167	4.617	1.905	4.882	14.645	-11.131	2.21
4.617	1.905	149.6	30.448	-10.4	12.231	4.616	1.905	5.48	16.297	-11.025	2.341
4.622	1.905	174.5	30.661	-10.393	13.21	4.615	1.905	5.98	17.71	-10.941	2.445
4.616	1.905	199.46	30.845	-10.387	14.123	4.614	1.905	6.48	19.009	-10.871	2.546
4.616	1.905	224.3	31.011	-10.381	14.977	4.613	1.905	6.98	20.035	-10.818	2.642
4.614	1.905	249.3	31.175	-10.376	15.789	4.612	1.905	7.38	20.994	-10.771	2.717
4.614	1.905	269.22	31.317	-10.371	16.408	4.613	1.905	7.98	21.837	-10.732	2.825
4.615	1.905	299.1	31.46	-10.367	17.295	4.612	1.905	8.48	22.606	-10.697	2.912
4.613	1.905	324.0	31.589	-10.363	18.0	4.611	1.905	8.974	23.32	-10.666	2.996
4.613	1.905	343.92	31.716	-10.359	18.545	4.61	1.905	9.47	23.892	-10.642	3.077
4.613	1.905	373.8	31.837	-10.355	19.334	4.609	1.905	9.97	24.624	-10.612	3.158
4.613	1.905	399.0	31.949	-10.351	19.975	4.609	1.905	10.47	24.887	-10.601	3.236
4.613	1.905	419.0	32.062	-10.348	20.469	4.609	1.905	10.97	25.234	-10.587	3.312
4.613	1.905	449.0	32.167	-10.345	21.19	4.608	1.905	11.47	25.55	-10.575	3.387
4.615	1.905	488.2	32.373	-10.338	22.095	4.615	1.905	488.2	32.373	-10.338	22.095

5.3. Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro $U_a = 19.95$ V

$U_f[V]$	$I_f[A]$	$U_a[V]$	I_a	$R_f[\Omega]$	$T [K]$	$x [1/K]$	y
4.238	1.805	19.95	10.692	2.348	1347.276	7.422	-25.858
4.275	1.815	19.95	11.78	2.355	1351.256	7.401	-25.767
4.31	1.825	19.95	12.982	2.362	1354.859	7.381	-25.675
4.348	1.835	19.95	14.304	2.369	1358.872	7.359	-25.584
4.388	1.845	19.95	15.771	2.378	1363.54	7.334	-25.493
4.427	1.855	19.95	17.347	2.386	1368.155	7.309	-25.404
4.465	1.865	19.95	19.085	2.394	1372.257	7.287	-25.315
4.504	1.875	19.95	20.975	2.402	1376.593	7.264	-25.227
4.541	1.885	19.95	23.027	2.409	1380.591	7.243	-25.139
4.574	1.895	19.95	25.268	2.414	1383.053	7.23	-25.05
4.611	1.905	19.95	27.714	2.42	1386.615	7.212	-24.963