

## PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

Diagnostika plazmatu důlnavého výboje pomocí jednoduché sondy

Zpracovali: Radek Horňák, Lukáš Vrána

Naměřeno: 1. 3. 2022

### 1 Teorie

#### 1.1 Elektrostatická Langmuirova sonda

Langmuirova sonda je vodič malých rozměrů zavedený do plazmatu, pomocí nějž lze měřit nejdůležitější parametry plazmatu jako elektronovou hustotu  $n_e$ , teplotu elektronů  $T_{e,\text{r}}$ , rozdělovací funkci elektronů  $f(v)$  a prostorové rozdělení potenciálu a elektrického pole. Napětí sondy  $V_s$  určujeme vzhledem k referenční elektrodě. Potenciál plazmatu v místě sondy vůči stejné referenční elektrodě označme  $V_p$ . Pokud je vůči ní plocha sondy velmi malá, můžeme sondu nazvat jednoduchou. Podle tvaru lze dále sondy dělit na válcové, kulové a rovinné. Závislost proudu protékajícího sondou  $I_s$  na napětí přiloženém na sondu  $V_s$  tvoří voltampérovou (VA) charakteristiku sondy. Napětí sondy  $U_s$  získáme pomocí vztahu

$$U_s = V_s - V_p \quad (1)$$

Pokud sonda není připojena k vnějšímu obvodu a proud elektronů i iontů na ni se ustálí, je výsledný proud nulový a sonda se ustálí na napětí  $V_f$ , tedy na plovoucím potenciálu.

VA charakteristiku jednoduché sondy můžeme rozdělit na tři části. Tou první je oblast saturovaného iontového proudu označená na obr. 1 jako A. Sonda je záporně nabita vzhledem k potenciálu plazmatu, elektrony jsou odpuzovány a ionty naopak přitahovány. Vizuálně se to projevuje temným prostorem obalujícím sondu.

Druhou část charakteristiky tvoří přechodová oblast, pro kterou lze  $U_s$  vymezit jako  $-2(V_p - V_f) \leq U_s \leq 0$ . Na obr. 1 se jedná o oblast B. Celkový proud sondou  $I_s$  můžeme vyjádřit jako

$$I_s = I_i + I_e \quad (2)$$

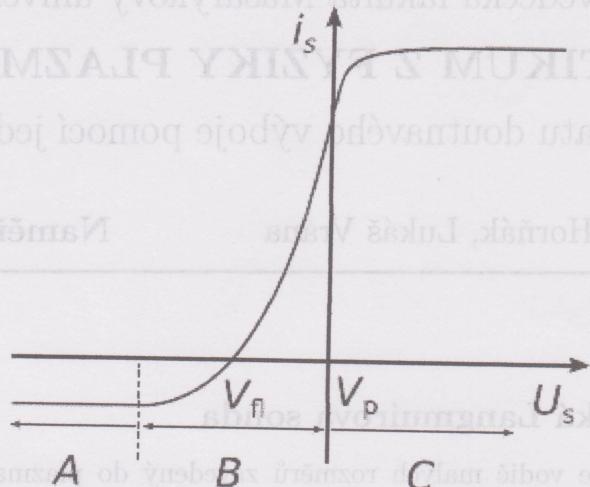
kde  $I_i$  je iontový proud a  $I_e$  elektronový proud, který je dán vztahem

$$I_e = S e n_e \sqrt{\frac{k T_e}{2 \pi m_e}} \exp\left(\frac{-e U_s}{k T_e}\right) \quad (3)$$

kde  $S$  je povrch sondy,  $e$  elementární náboj,  $n_e$  koncentrace elektronů,  $k$  Boltzmanova konstanta a  $m_e$  hmotnost elektronu.

Oblast saturovaného elektronového proudu je na obr. 1 označená jako C. Sonda je vzhledem k potenciálu plazmatu na kladném napětí a přitahuje tak elektrony. U válcové sondy nejeví tato oblast nasycení, nýbrž parabolicky narůstá.

U, V  
i(t) = 204

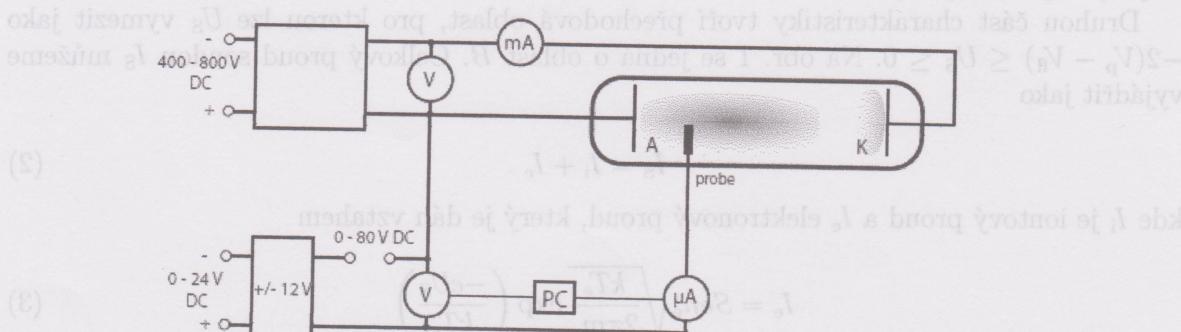


Obrázek 1: VA charakteristika jednoduché rovinné sondy.

## 2 Měření a výsledky

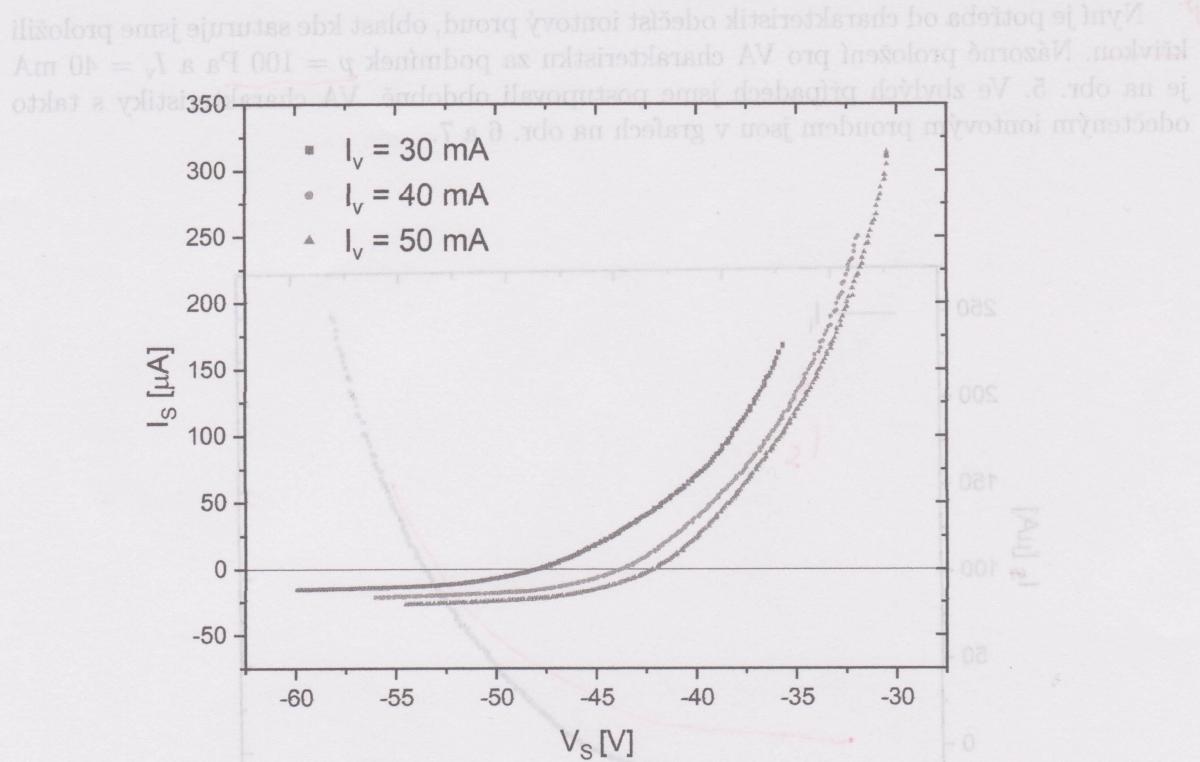
Měření provádíme na aparatuře, jejíž schéma je vidět na obr. 2. Výbojka je čerpaná rotační olejovou vývěvou. Tlak nastavujeme změnou průtoku argonu a měříme jej Piraniho manometrem. Do výbojky je zavedená jednoduchá válcová sonda, jejíž délku jsme odhadli na 8 mm a průměr 0,1 mm. Povrch podstavy válcové sondy je k povrchu jejího pláště  $S$  zanedbatelný, po zaokrouhlení dostáváme  $S = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ .

Při měření vždy nejprve nalezneme plovoucí potenciál, abychom měli jistotu, že naměříme oblast nalevo i napravo od něj. Napětí přiložené na sondu  $V_s$  se mění automaticky pomocí elektrického motorku, na kterém stačí zařadit rychlostní stupeň v jednom ze směrů chodu. Data jsou ukládána na počítač. Při vyhodnocování jsme je museli synchronizovat.

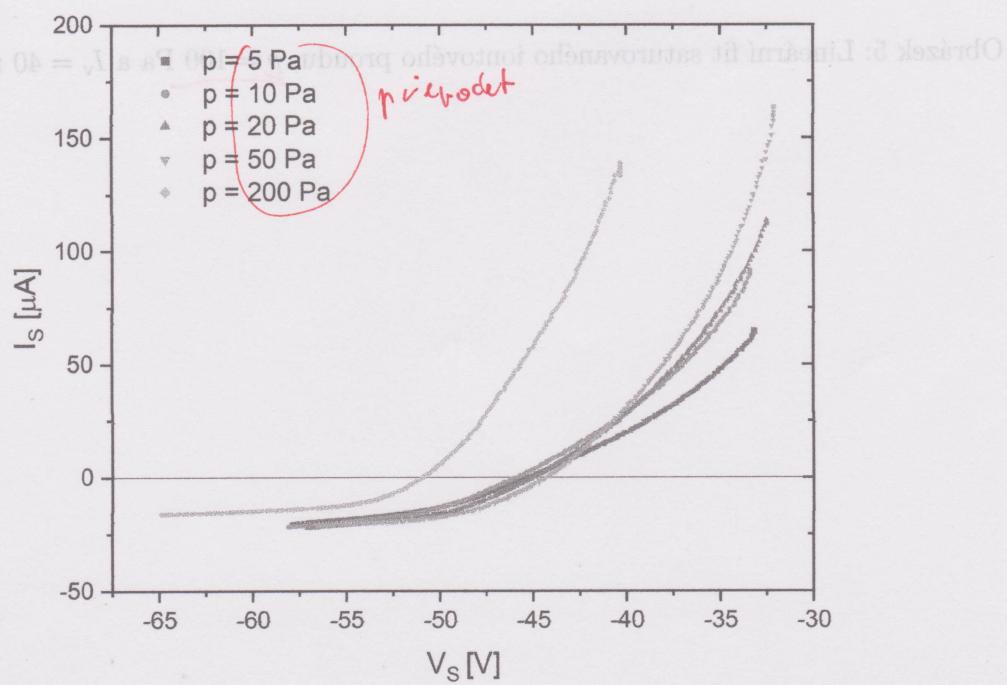


Obrázek 2: Schéma aparatury.

provedli jsme měření za konstantního tlaku 100 Pa pro tři hodnoty výbojového proudu  $I_v$ . Výsledné VA charakteristiky jsou v grafu na obr. 3. Z nich lze určit plovoucí potenciál, který se s rostoucím výbojovým proudem zvětšuje, viz tab. 1. Dále jsme provedli měření za konstantního výbojového proudu 40 mA pro pět hodnot tlaku. Odpovídající VA charakteristiky jsou v grafu na obr. 4. Pro tlak 200 Pa je plovoucí potenciál nejmenší, v oblasti 5–50 Pa však nevykazuje žádný trend, viz tab. 1.

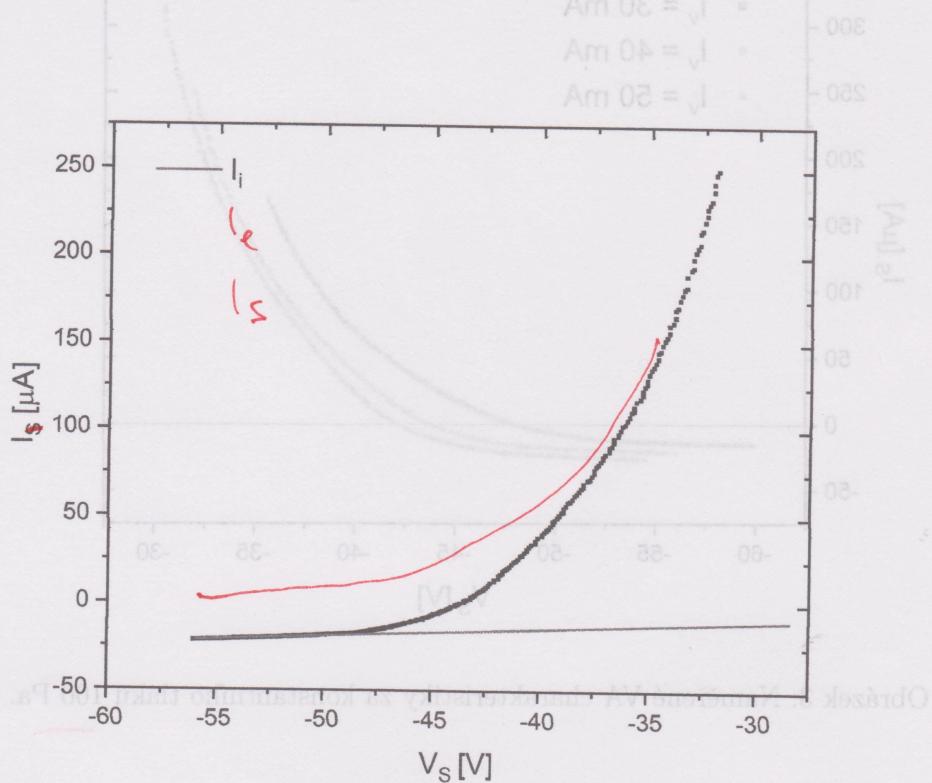


Obrázek 3: Naměřené VA charakteristiky za konstantního tlaku 100 Pa. *prirodět*

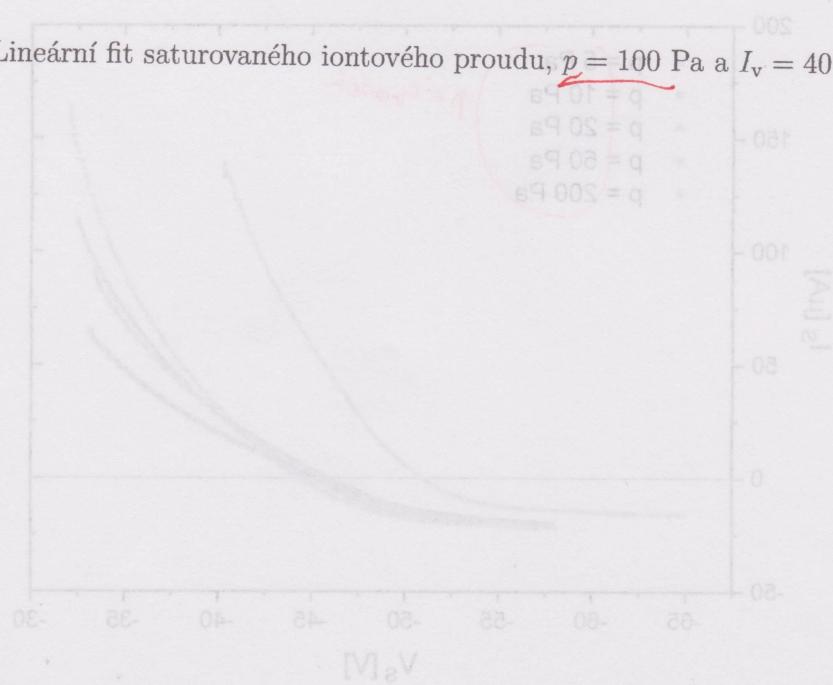


Obrázek 4: Naměřené VA charakteristiky za konstantního výbojového proudu 40 mA.

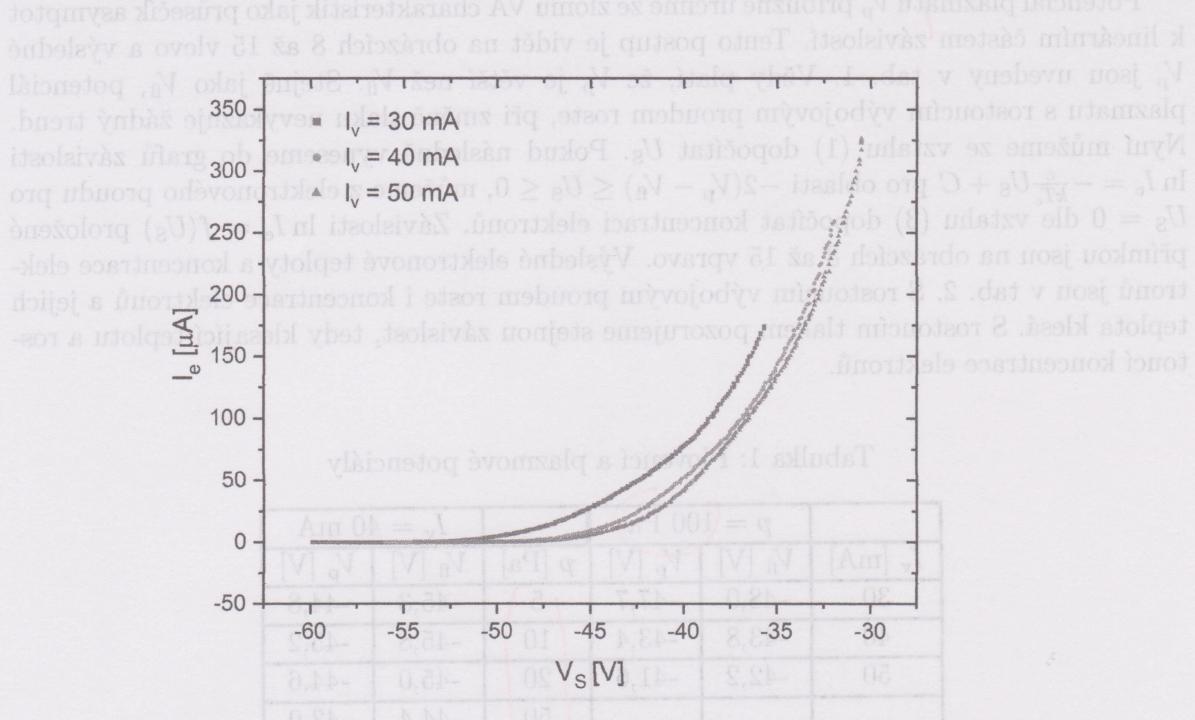
*Příklad*  
Nyní je potřeba od charakteristik odečíst iontový proud, oblast kde saturuje jsme proložili krivkou. Názorné proložení pro VA charakteristku za podmínek  $p = 100 \text{ Pa}$  a  $I_v = 40 \text{ mA}$  je na obr. 5. Ve zbylých případech jsme postupovali obdobně. VA charakteristiky s takto odečteným iontovým proudem jsou v grafech na obr. 6 a 7.



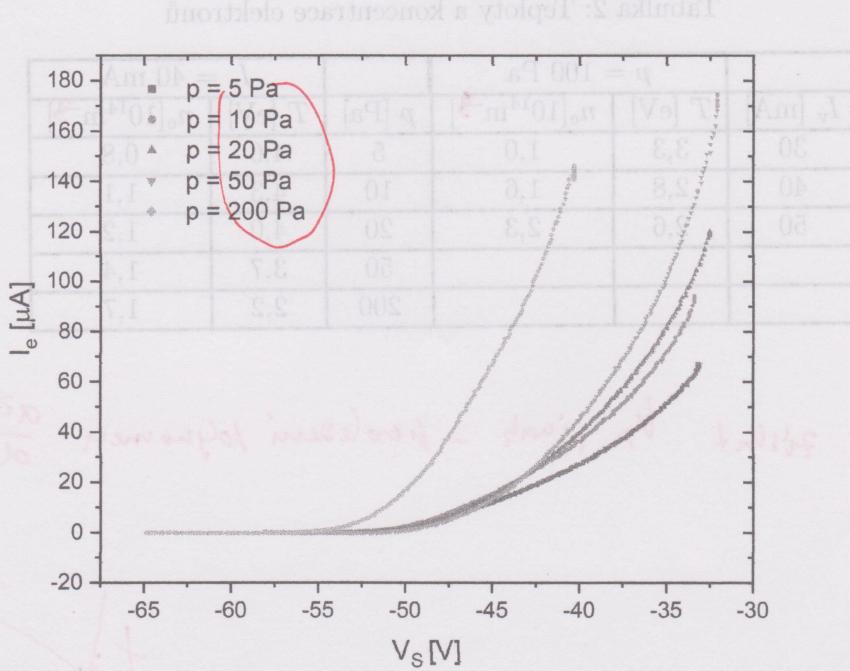
Obrázek 5: Lineární fit saturovaného iontového proudu,  $p = 100 \text{ Pa}$  a  $I_v = 40 \text{ mA}$ .



Obrázek 6: Násobené VA charakteristiky s iontovým proudem  $I_i$  pro



Obrázek 6: VA charakteristiky s odečteným iontovým proudem pro měření s konstantním tlakem  $p = 100 \text{ Pa}$ .



Obrázek 7: VA charakteristiky s odečteným iontovým proudem pro měření s konstantním proudem  $I_v = 40 \text{ mA}$ .

zlogarifikovat

Potenciál plazmatu  $V_p$  přibližně určíme ze zlomu VA charakteristik jako průsečík asymptot k lineárním částem závislostí. Tento postup je vidět na obrázcích 8 až 15 vlevo a výsledné  $V_p$  jsou uvedeny v tab. 1. Vždy platí, že  $V_p$  je větší než  $V_{fl}$ . Stejně jako  $V_{fl}$ , potenciál plazmatu s rostoucím výbojovým proudem roste, při změně tlaku nevykazuje žádný trend. Nyní můžeme ze vztahu (1) dopočítat  $U_S$ . Pokud následně vyneseme do grafů závislosti  $\ln I_e = -\frac{e}{kT_e} U_S + C$  pro oblasti  $-2(V_p - V_{fl}) \leq U_S \leq 0$ , můžeme z elektronového proudu pro  $U_S = 0$  dle vztahu (3) dopočítat koncentraci elektronů. Závislosti  $\ln I_e = f(U_S)$  proložené přímkou jsou na obrázcích 8 až 15 vpravo. Výsledné elektronové teploty a koncentrace elektronů jsou v tab. 2. S rostoucím výbojovým proudem roste i koncentrace elektronů a jejich teplota klesá. S rostoucím tlakem pozorujeme stejnou závislost, tedy klesající teplotu a rostoucí koncentraci elektronů.

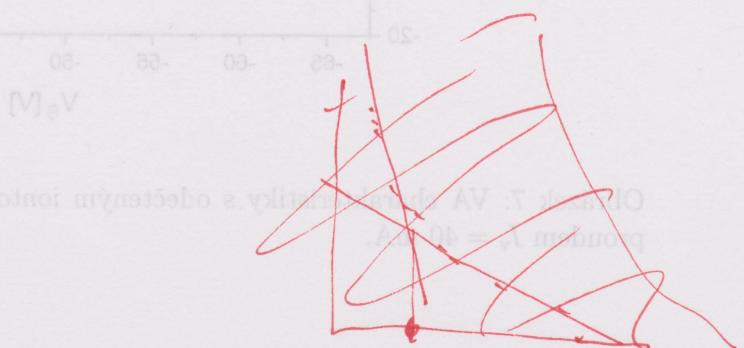
Tabulka 1: Plovoucí a plazmové potenciály

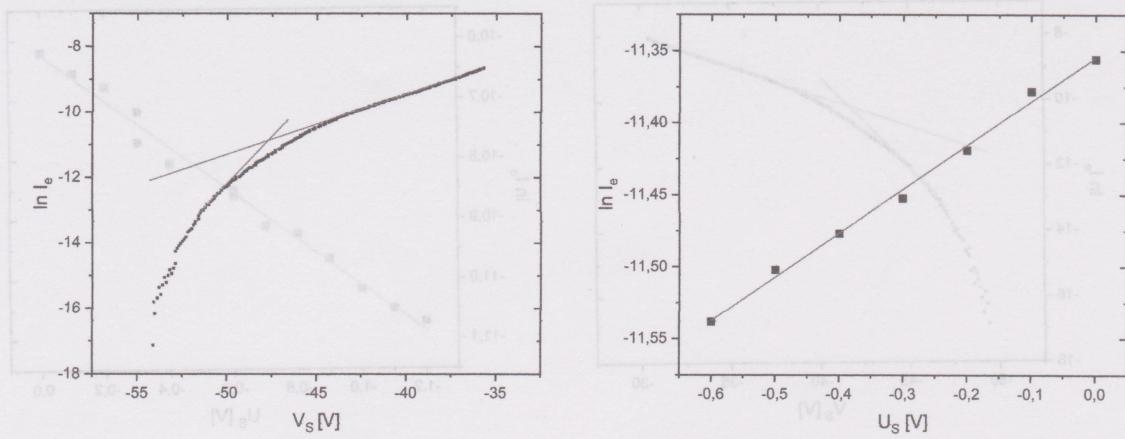
$I_v$ [mA]	$p = 100$ Pa		$p$ [Pa]	$I_v = 40$ mA	
	$V_{fl}$ [V]	$V_p$ [V]		$V_{fl}$ [V]	$V_p$ [V]
30	-48,0	-47,7	5	-45,3	-44,8
40	-43,8	-43,4	10	-45,8	-45,2
50	-42,2	-41,6	20	-45,0	-44,6
			50	-44,4	-43,9
			200	-50,9	-49,9

Tabulka 2: Teploty a koncentrace elektronů

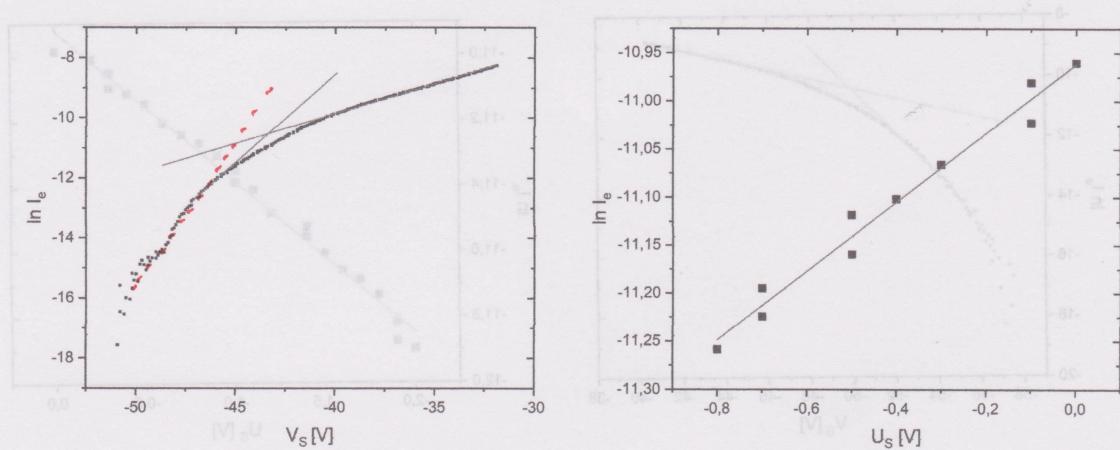
$I_v$ [mA]	$p = 100$ Pa		$p$ [Pa]	$I_v = 40$ mA	
	$T$ [eV]	$n_e [10^{14} m^{-3}]$		$T$ [eV]	$n_e [10^{14} m^{-3}]$
30	3,3	1,0	5	4,6	0,8
40	2,8	1,6	10	4,3	1,1
50	2,6	2,3	20	4,0	1,2
			50	3,7	1,4
			200	2,2	1,7

získat získat  $V_p$  jinak - počítání polynomem  $\frac{\partial^2}{\partial U^2}, \dots$

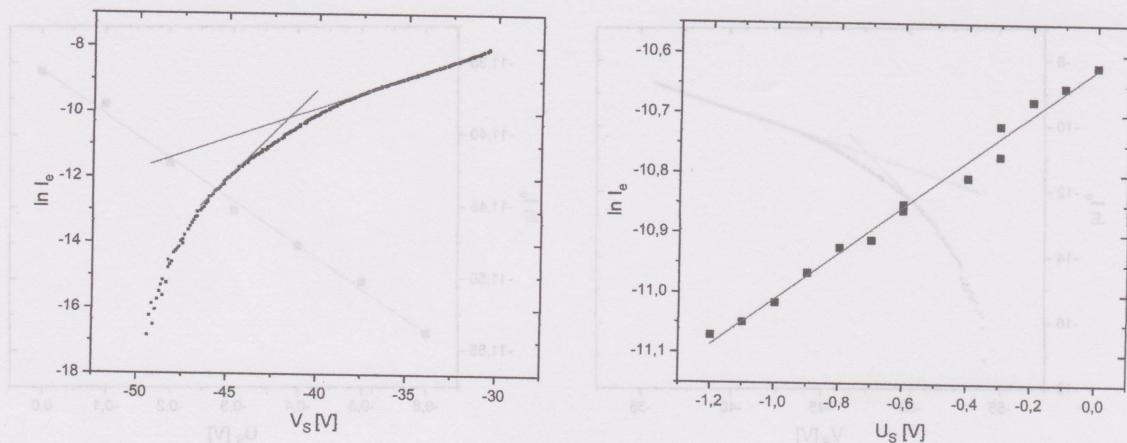




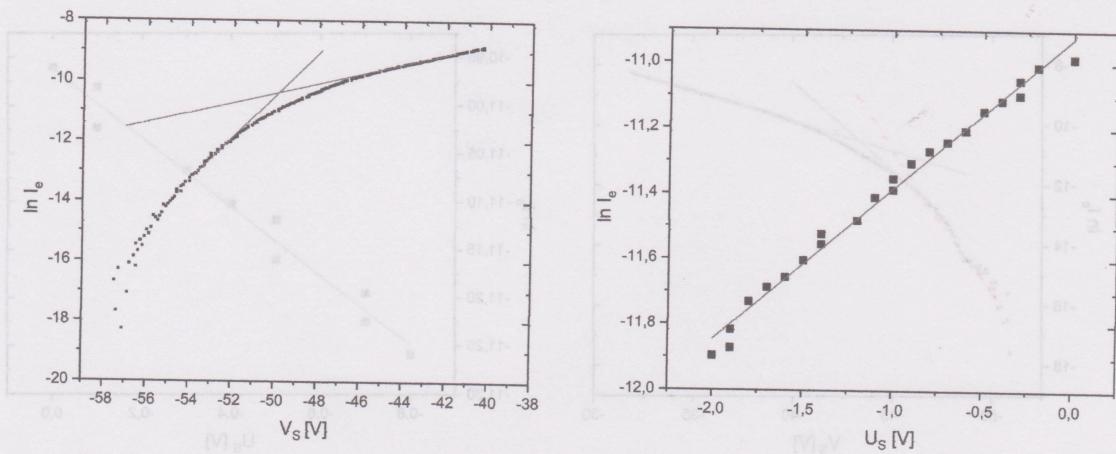
Obrázek 8: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty,  $p = 100$  Pa a  $I_v = 30$  mA.



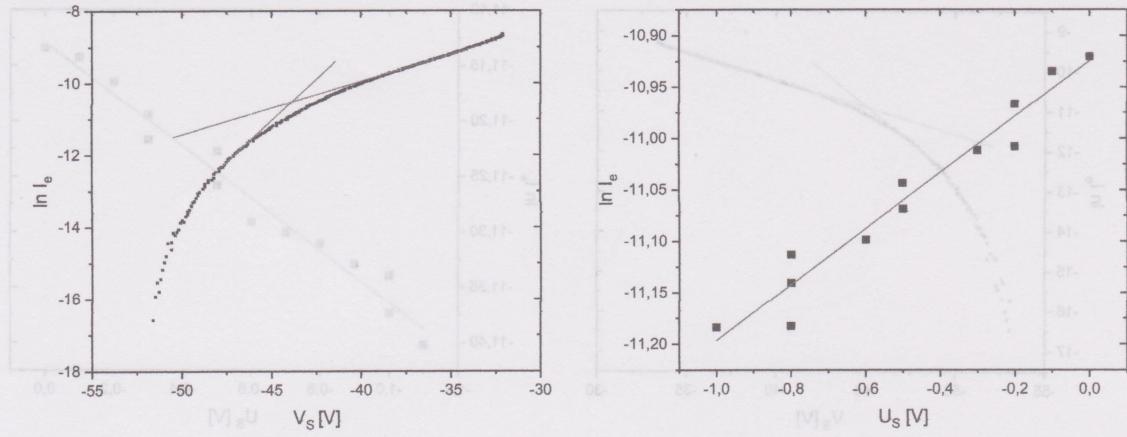
Obrázek 9: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty,  $p = 100$  Pa a  $I_v = 40$  mA.



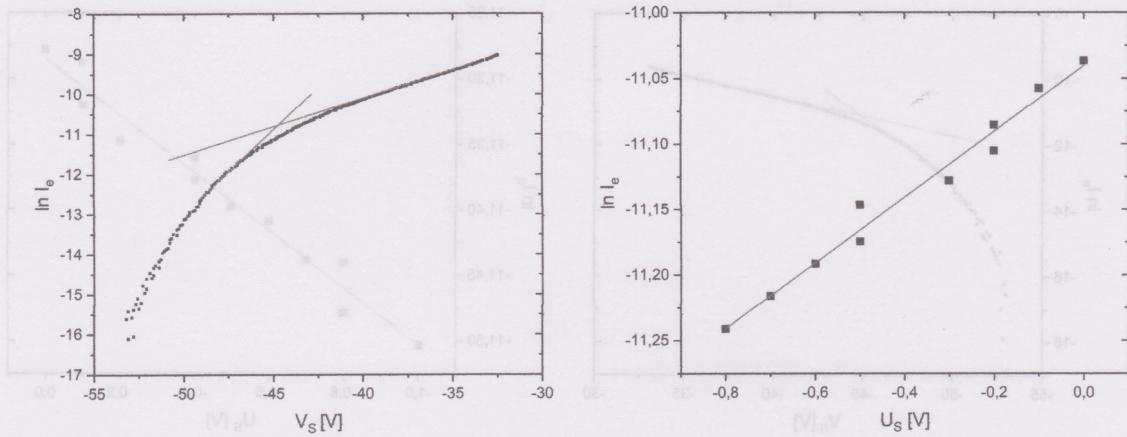
Obrázek 10: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty,  $p = 100 \text{ Pa}$  a  $I_v = 50 \text{ mA}$ .<sup>10</sup>



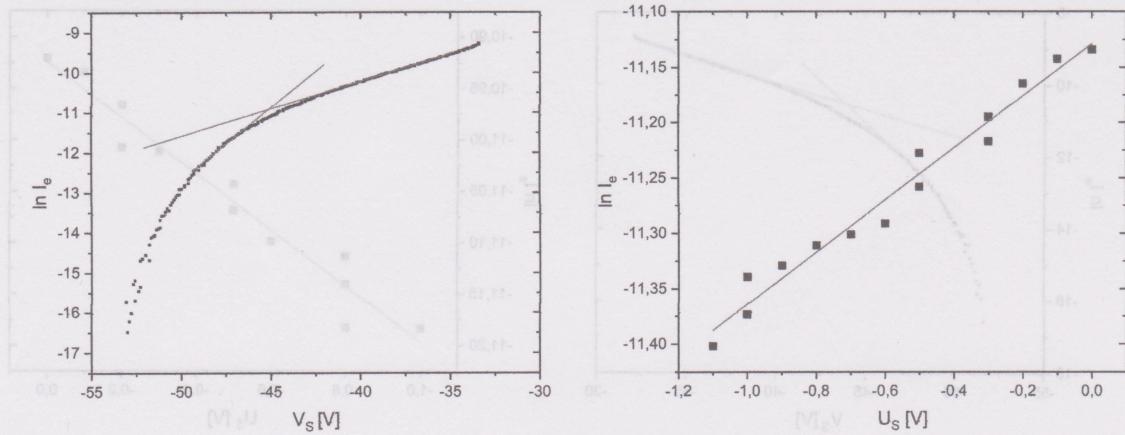
Obrázek 11: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty,  $p = 200 \text{ Pa}$  a  $I_v = 40 \text{ mA}$ .<sup>10</sup>



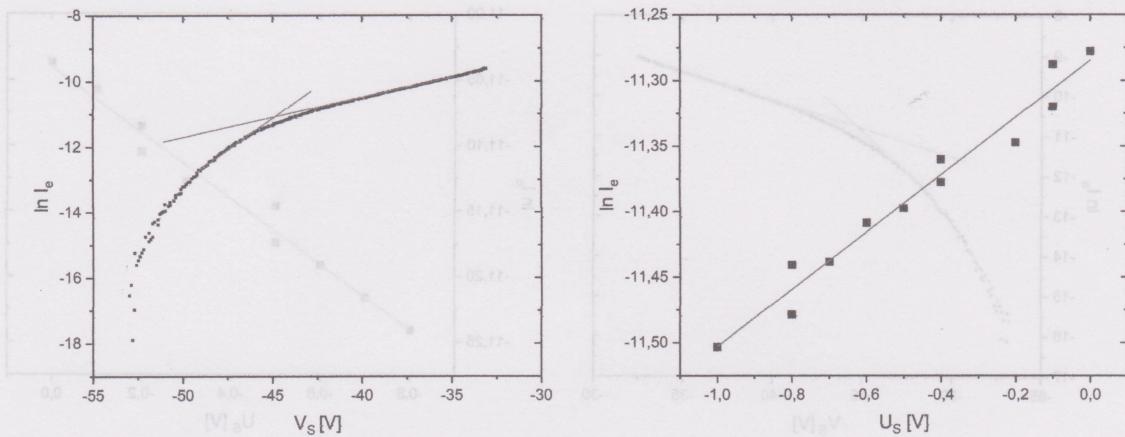
Obrázek 12: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty,  $p = 50$  Pa a  $I_v = 40$  mA.



Obrázek 13: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty,  $p = 20 \text{ Pa}$  a  $I_v = 40 \text{ mA}$ .



Obrázek 14: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty,  $p = 10$  Pa a  $I_v = 40$  mA.



Obrázek 15: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty,  $p = 5$  Pa a  $I_v = 40$  mA.

### 3 Závěr

V této úloze jsme se seznámili s měřením pomocí Langmuirovy jednoduché válcové sondy. Naměřili jsme osm VA charakteristik pro různé podmínky. Určili jsme plovoucí potenciál sondy, který se zvětšuje s rostoucím výbojovým proudem, při změnách tlaku za konstantního proudu nevykazoval žádný trend. Dále jsme určili potenciál plazmatu, ten je vždy větší než plovoucí potenciál a při změnách výbojového proudu a tlaku se chová obdobně jako plovoucí potenciál. Nakonec jsme získali elektronové teploty a spočítali elektronovou koncentraci. S rostoucím výbojovým proudem roste i koncentrace elektronů a jejich teplota klesá. S rostoucím tlakem jsme pozorovali stejnou závislost, tedy rostoucí koncentraci elektronů a klesající elektronovou teplotu.