

## PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

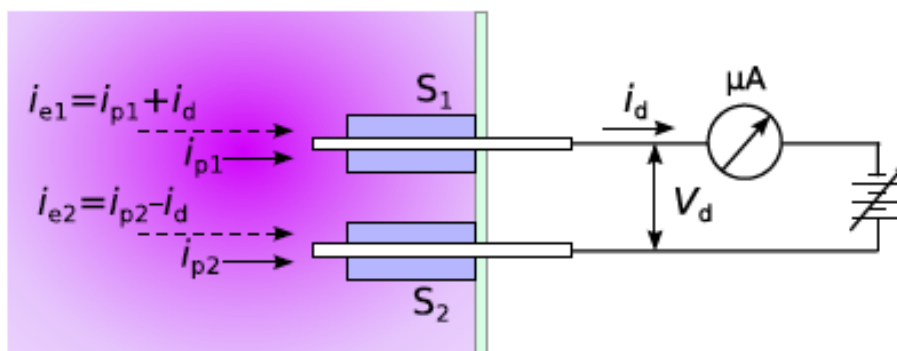
### Studium kladného sloupce doutnavého výboje pomocí elektrostatických sond: dvojná sonda

**Zpracovali:** Radek Horňák, Lukáš Vrána

**Naměřeno:** 5. 4. 2022

## 1 Teorie

Jednou z možných konstrukcí Langmuirovy sondy je takzvaná dvojná sonda. Ta se může skládat například ze dvou jednoduchých válcových sond stejných rozměrů. Mezi nimi by měla být dostatečná vzdálenost, aby se nepřekrývaly jejich stěnové vrstvy a také by měly být ve stejných regionech plazmatu. V porovnání s jednoduchou sondou její VA charakteristika vždy vykazuje strmou oblast v okolí nulového napětí. Zároveň saturovaný iontový proud limituje proud obvodem, sonda tak méně narušuje samotné plazma. Schématické dvojné znázornění sondy je na obr. 1. Sonda se ustavuje na plovoucím potenciálu  $V_{\text{fl}}$ . Měříme cirkulační proud  $i_d$  okruhem sond při přiloženém napětí  $V_d$  mezi ně.

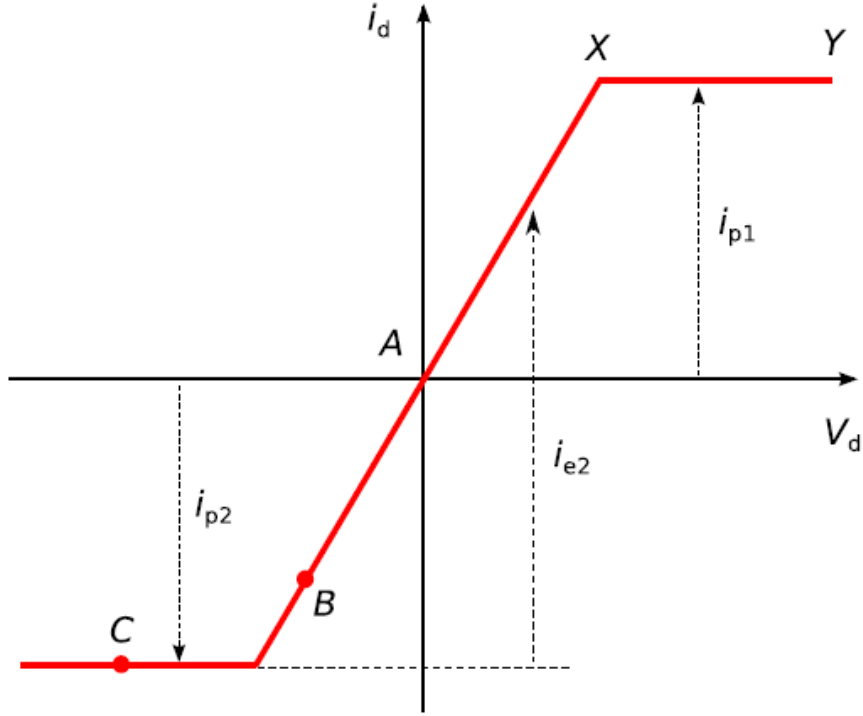


Obrázek 1: Schéma dvojité sondy [1].

VA charakteristika ideální dvojně rovinné sondy je na obr. 2. V bodě  $A$ , kde platí  $V_d = 0$  a  $i_d = 0$ , se obě sondy nachází na témže plovoucím potenciálu  $V_{\text{fl}}$ .

$V_d < 0$  kolem bodu  $B$  je oblast takzvaného záporného napětí. Platí zde  $\sum i_p + \sum i_e = 0$ . Potenciál první ze sond se blíží potenciálu plazmatu, potenciál druhé sondy bude nižší než plovoucí.

Kolem bodu  $C$  platí  $V_d \ll 0$ , jedná se tedy o oblast VA charakteristiky s velkým záporným napětím. První sonda přebírá veškerý tok elektronů, druhá sonda je silně negativní vzhledem k potenciálu plazmatu. Pokud dále vzrůstá  $V_d$ , dojde k nasycení iontového proudu druhé sondy a celkový proud vnějším okruhem  $i_d$  zůstává konstantní.



Obrázek 2: Charakteristika ideální dvojné rovinné sondy [1].

## 1.1 Výpočet elektronové teploty rezistenční metodou

Teplotu elektronů můžeme získat ze vztahu

$$T_e = \frac{e}{k}(G - G^2)R_0 \sum i_p \quad (1)$$

kde  $G$  je

$$G = \left[ \frac{i_{e2}}{\sum i_p} \right] \quad (2)$$

pro  $V_d = 0$  a  $R_0$  je tzv. ekvivalentní odpor sondy

$$R_0 = \left[ \frac{dV_d}{di_d} \right] \quad (3)$$

opět pro  $V_d = 0$ . Dále platí

$$i_{e2} = |i_{p2}| + i_d \quad (4)$$

$$\sum i_p = i_{p1} + i_{p2} \quad (5)$$

## 1.2 Určení elektronové teploty z funkce tanh

Teplotu elektronů můžeme také určit z graficky vynesené závislosti

$$i_d = I_0 \tanh\left(\frac{eV_d}{kT_e}\right) + AV_d + B \quad (6)$$

### 1.3 Určení koncentrace elektronů

Koncentraci elektronů za předpokladu  $n_e = n_p$  a  $T_e = T_p$  lze určit z rovnice

$$n_p = \frac{4i_p}{Se \langle v_p \rangle} \quad (7)$$

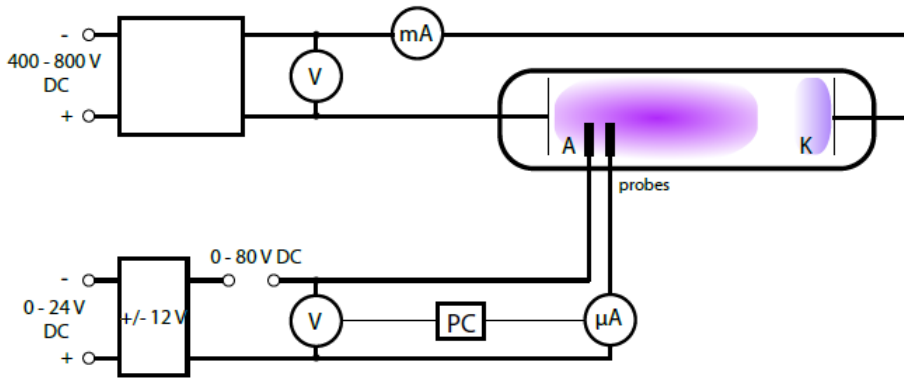
kde  $S$  je plocha sondy a  $\langle v_p \rangle$  získáme jako

$$\langle v_p \rangle = \left( \frac{8kT_p}{\pi M} \right) \quad (8)$$

kde  $T_p$  je teplota iontů a  $M$  je hmotnost iontu.

### 1.4 Měření a výsledky

V našem případě měříme pomocí dvojné symetrické válcové sondy, obě její části jsou umístěné v ekvipotenciální ploše plazmatu. Schéma zapojení sondy je na obr. 3. Pracovní plyn je argon. Provedli jsme tři měření pro proud výbojem  $I_v = 55$  mA a tlak  $p = 8$ – $160$  Pa a jedno měření s odlišným proudem  $I_v = 30$  mA při tlaku  $p = 160$  Pa.

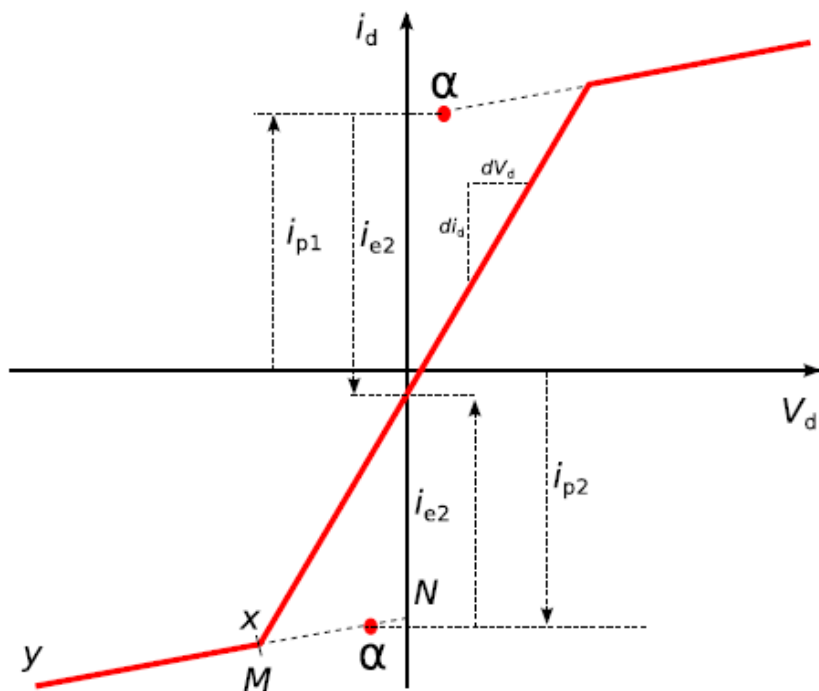


Obrázek 3: Schéma zapojení měřicí aparatury [1].

Vyhodnocení dat provedeme podle obr. 4. Všechny tři lineární oblasti charakteristik proložíme přímkou. Poté určíme bod  $\alpha$ , který se nachází ve vzdálenosti  $\frac{1}{5}MN$  od osy  $y$ . V bodě  $\alpha$  lze určit proudy  $i_{p1}$  a  $i_{p2}$ . Proud  $i_d$  získáme jako průsečík VA charakteristiky s  $y$  osou v bodě  $x = 0$ . Grafy charakteristik, ze kterých odečítáme výše zmíněné veličiny, jsou na obr. 5 až 8.  $R_0$  určíme ze směrnice přímky, kterou jsme proložili střední strmou část charakteristiky, viz rovnice (3). Zbylé veličiny, tedy  $i_{e2}$  a  $G$  spočítáme z rovnic (4), (5) a (2). Plochu sondy  $S$  jsme spočítali pomocí odhadnutých rozměrů ze vztahu (9), kde její délka je  $l = 8$  mm a její poloměr  $r = 0,05$  mm. Tloušťku stěnové vrstvy zanedbáme.

$$S = 2\pi r l = 2,51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (9)$$

Pak již můžeme spočítat teplotu elektronů z rovnice (1) a koncentraci elektronů z (7), výsledky jsou v tabulce 1. Vidíme, že s rostoucím tlakem roste koncentrace elektronů. Teplota elektronů nevykazuje žádný trend. Při snížení proudu výboje za konstantního tlaku dojde ke snížení teploty i koncentrace elektronů.

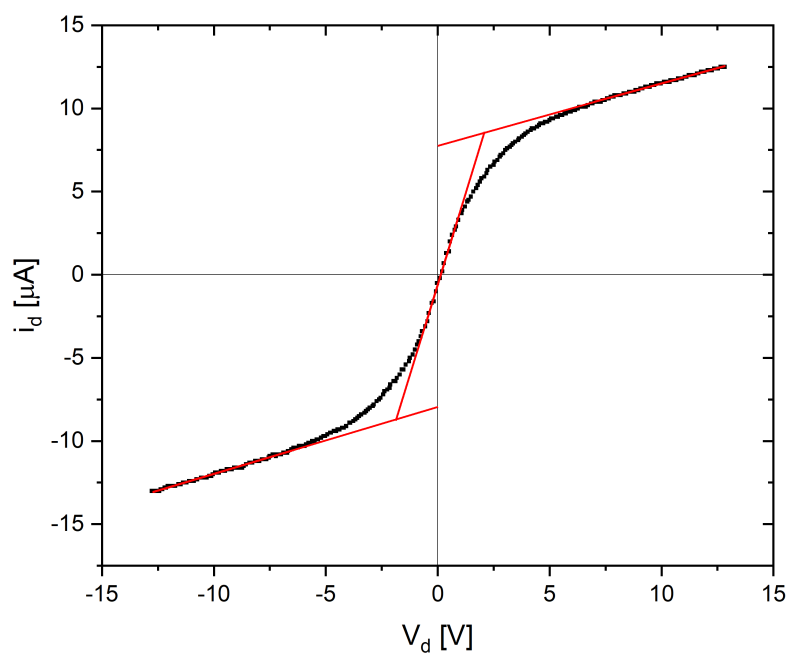


Obrázek 4: Vyhodnocení VA charakteristiky dvojné sondy [1].

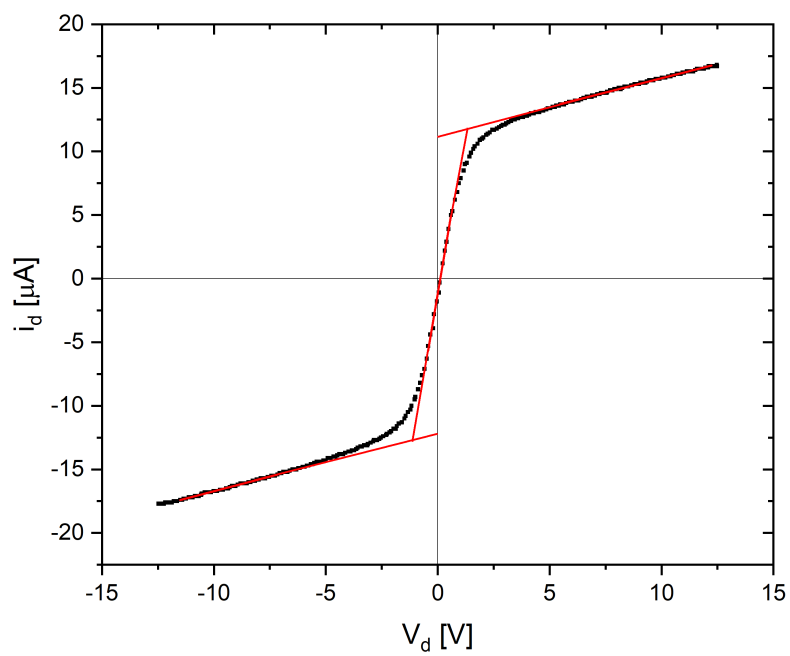
Teplotu určíme i druhým způsobem, tedy pomocí rovnice (6). Proložení charakteristik funkcí (6) je vidět na obrázcích 9 až 12. a dopočítaná koncentrace elektronů ze vztahu (7) je v tabulce 2. Oproti rezistenční metodě jsou teploty z tanh fitu vyšší a koncentrace nižší. Vztah (6) sedí dobře, pro závislosti na obrázcích 11 a 12 by však mohl být vhodnější fit ve tvaru

$$i_d = I_0 \tanh \left( \frac{e(V_d - V_0)}{kT_e} \right) + A(V_d - V_0) + B \quad (10)$$

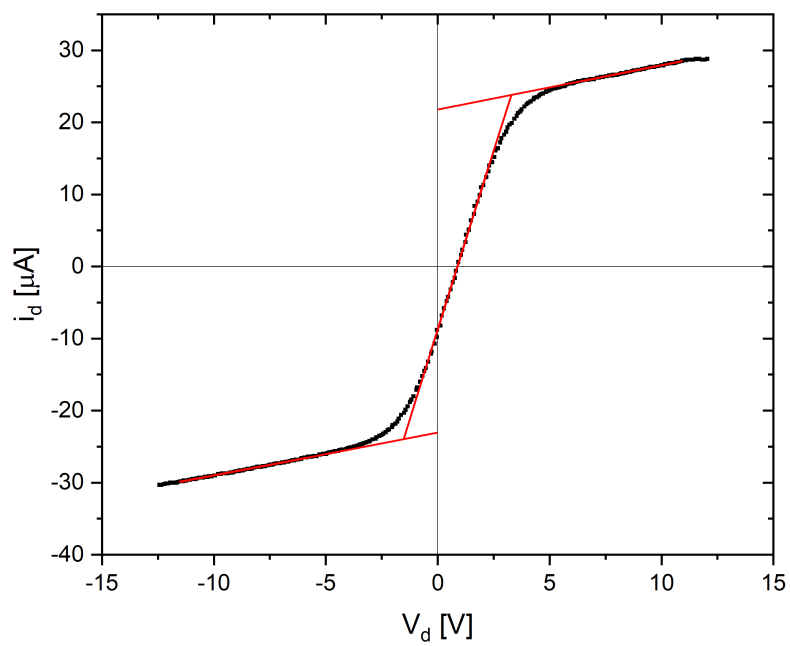
kde veličina  $V_0$  zajistí lépe sedící proložení na naše data. Tento fit by však ovlivnil výsledky jen přibližně o  $\pm 10 \%$ , proto zůstaneme u původního podle vztahu (6).



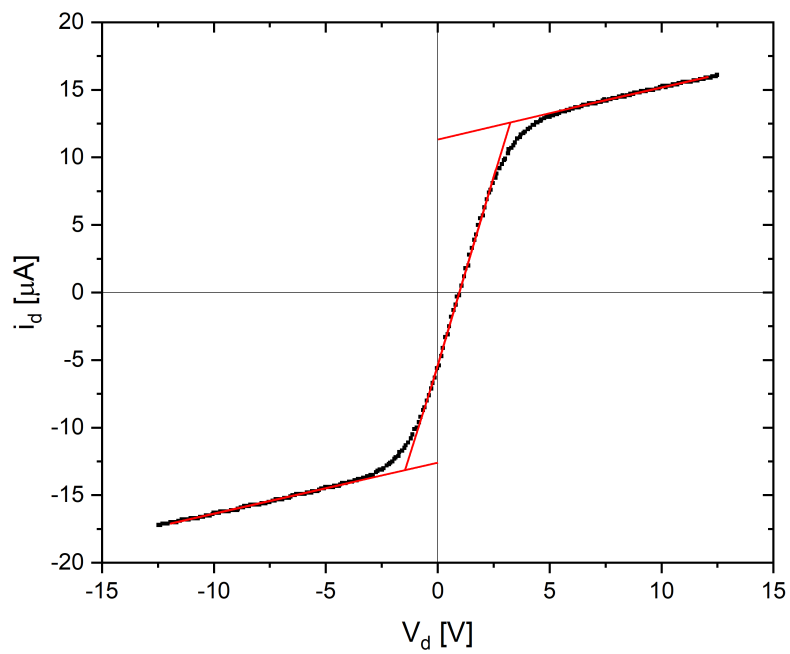
Obrázek 5: VA charakteristika za podmínek  $p = 8$  Pa,  $I_v = 55$  mA.



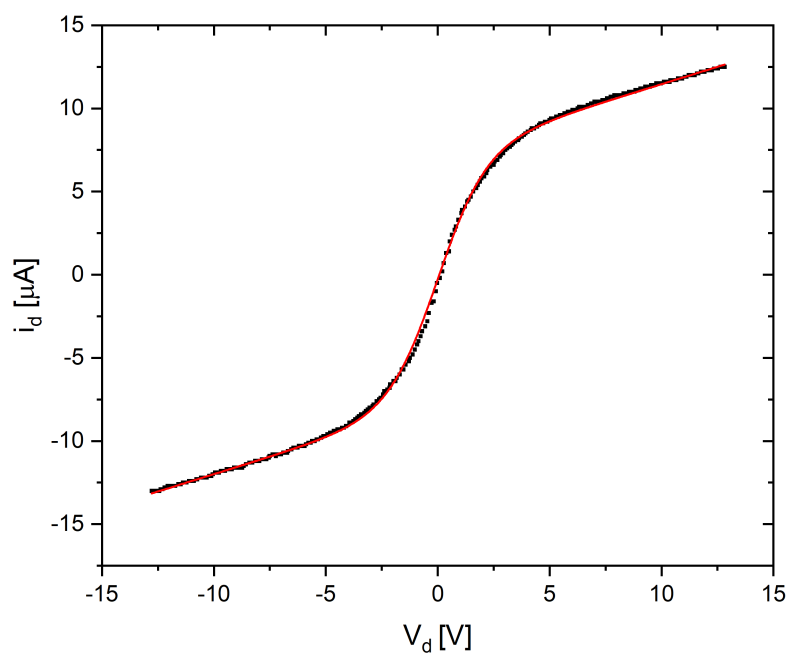
Obrázek 6: VA charakteristika za podmínek  $p = 32$  Pa,  $I_v = 55$  mA.



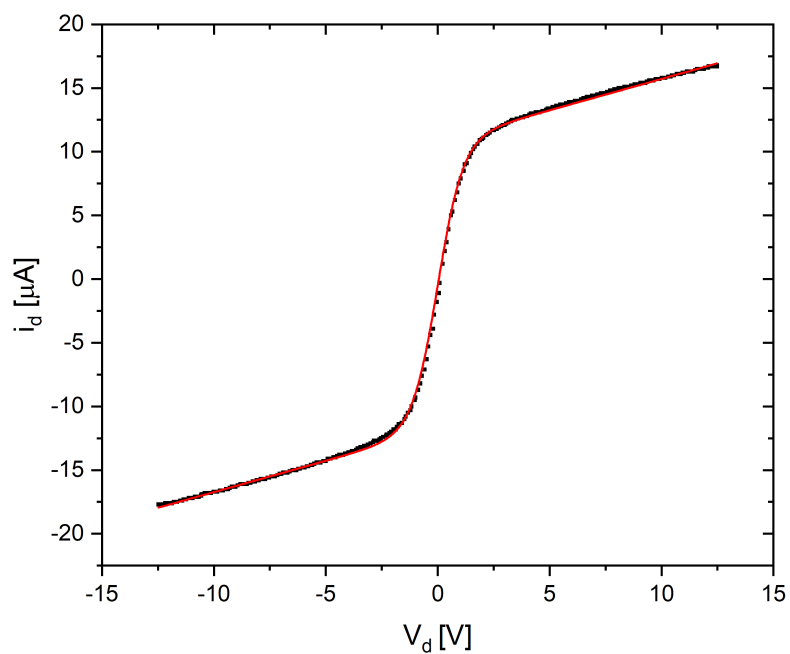
Obrázek 7: VA charakteristika za podmínek  $p = 160$  Pa,  $I_v = 55$  mA.



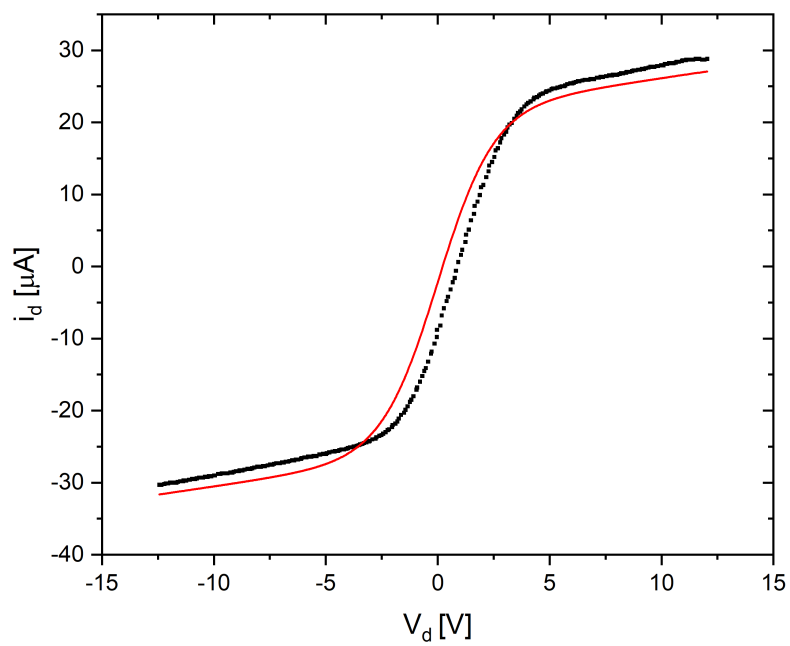
Obrázek 8: VA charakteristika za podmínek  $p = 160$  Pa,  $I_v = 30$  mA.



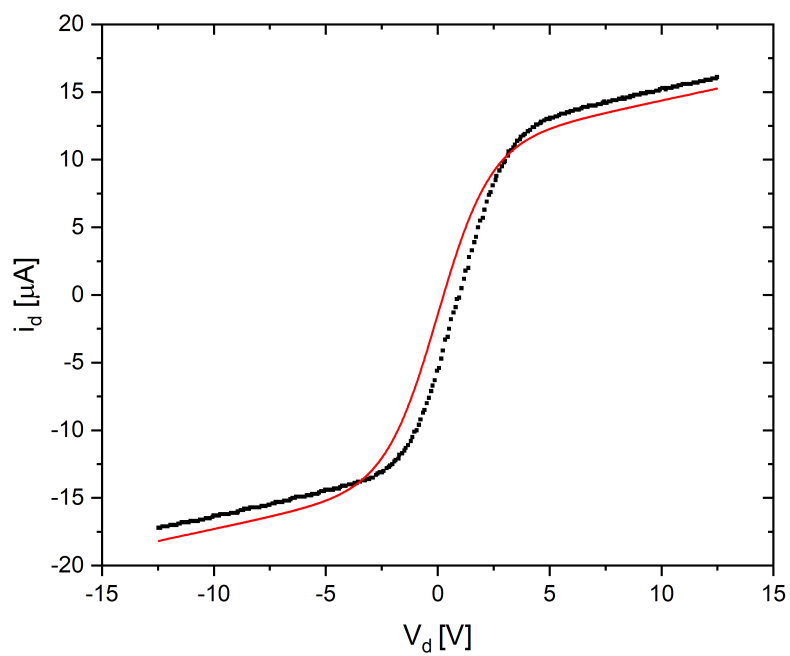
Obrázek 9: VA charakteristika za podmínek  $p = 8$  Pa,  $I_v = 55$  mA proložená funkcí podle rovnice (6).



Obrázek 10: VA charakteristika za podmínek  $p = 32$  Pa,  $I_v = 55$  mA proložená funkcí podle rovnice (6).



Obrázek 11: VA charakteristika za podmínek  $p = 160$  Pa,  $I_v = 55$  mA proložená funkcí podle rovnice (6).



Obrázek 12: VA charakteristika za podmínek  $p = 160$  Pa,  $I_v = 30$  mA proložená funkcí podle rovnice (6).



Tabulka 1: Teploty určené rezistenční metodou a koncentrace elektronů.

$I_v = 55 \text{ mA}$			$p = 160 \text{ [Pa]}$		
$p \text{ [Pa]}$	$T_e \text{ [eV]}$	$n_e \text{ [} 10^{14} \text{ m}^{-3}\text{]}$	$I_v \text{ [mA]}$	$T_e \text{ [eV]}$	$n_e \text{ [} 10^{14} \text{ m}^{-3}\text{]}$
8	0,91	3,33	30	0,92	4,84
32	0,57	6,01			
160	1,00	8,91			

Tabulka 2: Teploty z funkce tanh a koncentrace elektronů.

$I_v = 55 \text{ mA}$			$p = 160 \text{ [Pa]}$		
$p \text{ [Pa]}$	$T_e \text{ [eV]}$	$n_e \text{ [} 10^{14} \text{ m}^{-3}\text{]}$	$I_v \text{ [mA]}$	$T_e \text{ [eV]}$	$n_e \text{ [} 10^{14} \text{ m}^{-3}\text{]}$
8	2,20	2,14	30	2,34	3,03
32	1,13	4,24			
160	2,51	5,62			

## 2 Závěr

V této úloze jsme se seznámili s měřením důležitých veličin plazmatu pomocí dvojné sondy. Z naměřených charakteristik za různých podmínek se nám povedlo určit teplotu elektronů  $T_e$  a jejich koncentraci  $n_e$ . Teplota elektronů získaná rezistenční metodou s rostoucím tlakem nevykazuje žádný trend, koncentrace elektronů však roste. Za sníženého proudu výbojem při udržování konstantního tlaku klesla teplota i koncentrace elektronů. Obdobný vývoj měly hodnoty získané z proložení charakteristik funkcí tanh, teploty však byly vyšší a koncentrace nižší.

## Reference

- [1] Návod k praktiku: *Studium kladného sloupce doutnavého výboje pomocí elektrostatických sond: dvojná sonda.*