

PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

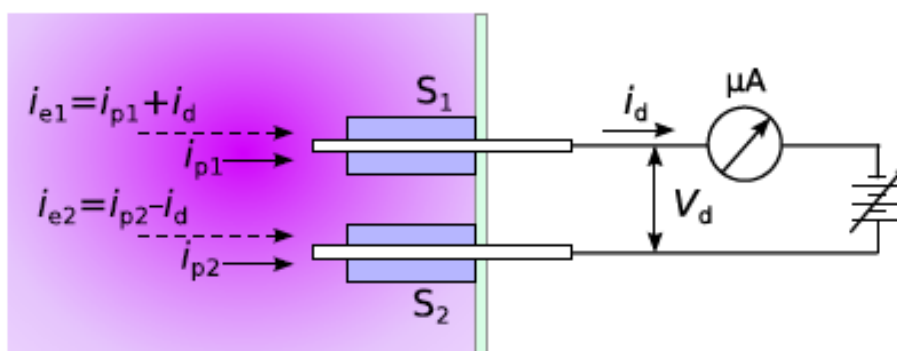
Studium kladného sloupce doutnavého výboje pomocí elektrostatických sond: dvojná sonda

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_{fl} . Měříme cirkulační proud i_d okruhem sond při přiloženém napětí V_d mezi ně.

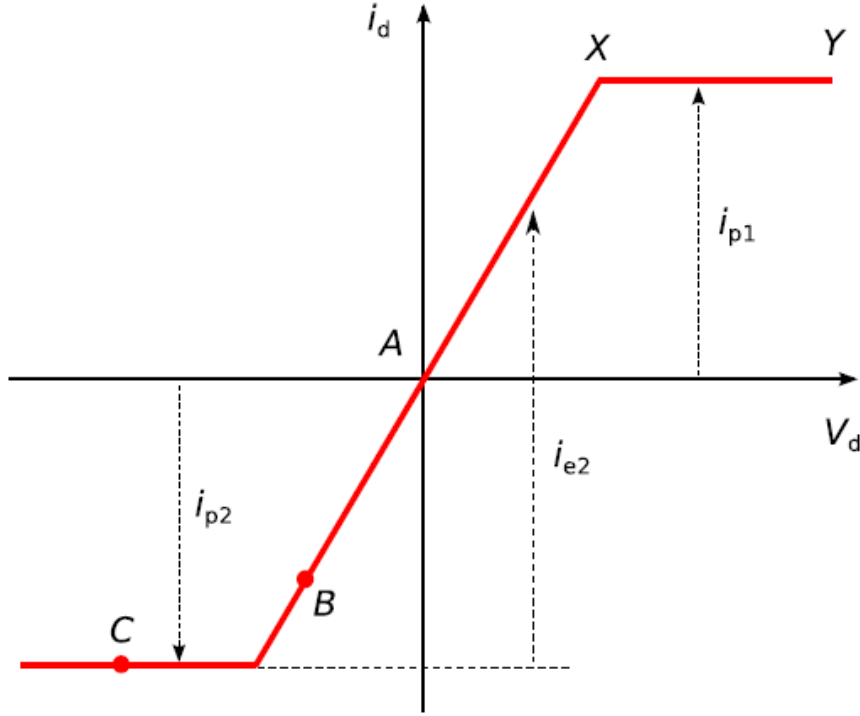


Obrázek 1: Schéma dvojité sondy.

VA charakteristika ideální dvojné rovinné sondy je na obr. 2. V bodě A, kde platí $V_d = 0$ a $i_d = 0$, se obě sondy nachází na téže plovoucím potenciálu V_{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.

Teplotu elektronů z měření dvojnou sondou získáme 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

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

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

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

$$n_p = \frac{4_p}{Se \langle v_p \rangle} \quad (6)$$

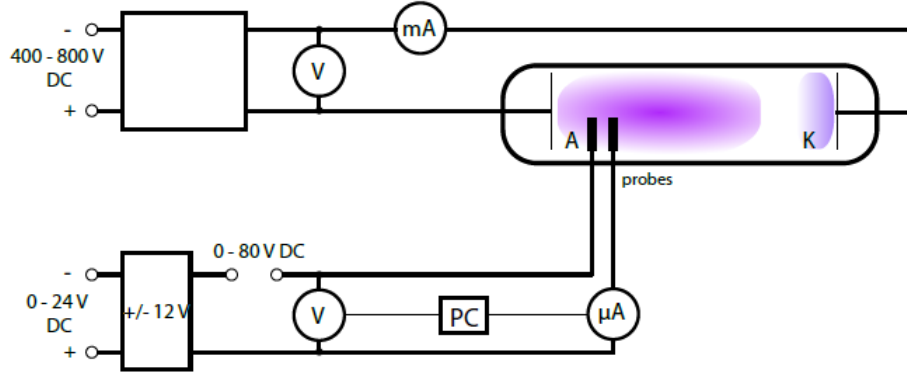
kde S je plocha sondy a $\langle v_p \rangle$ získáme jako

$$\langle v_p \rangle = \left(\frac{8kT_p}{\pi M} \right) \quad (7)$$

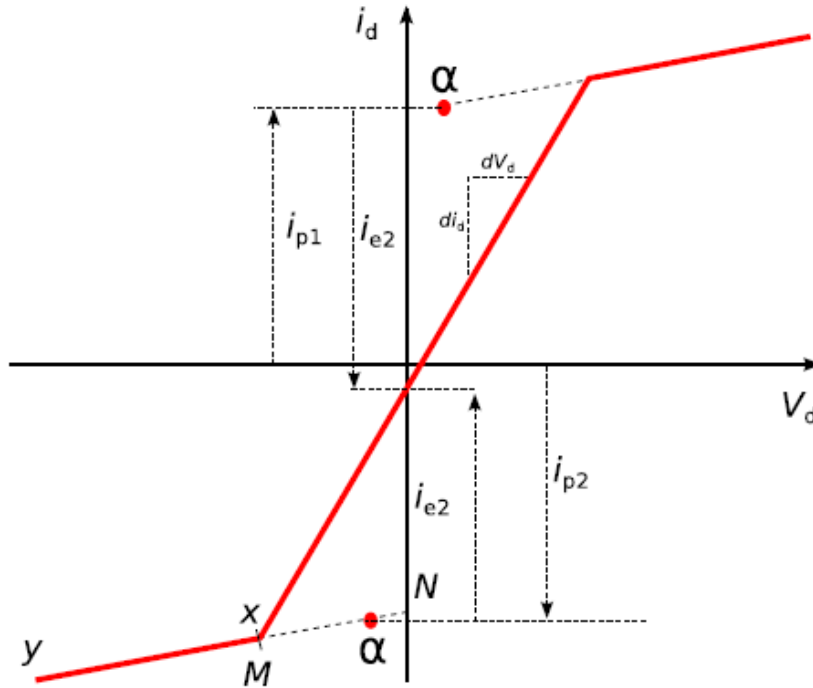
kde T_p je teplota iontů a M je hmotnost iontu.

1.1 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.



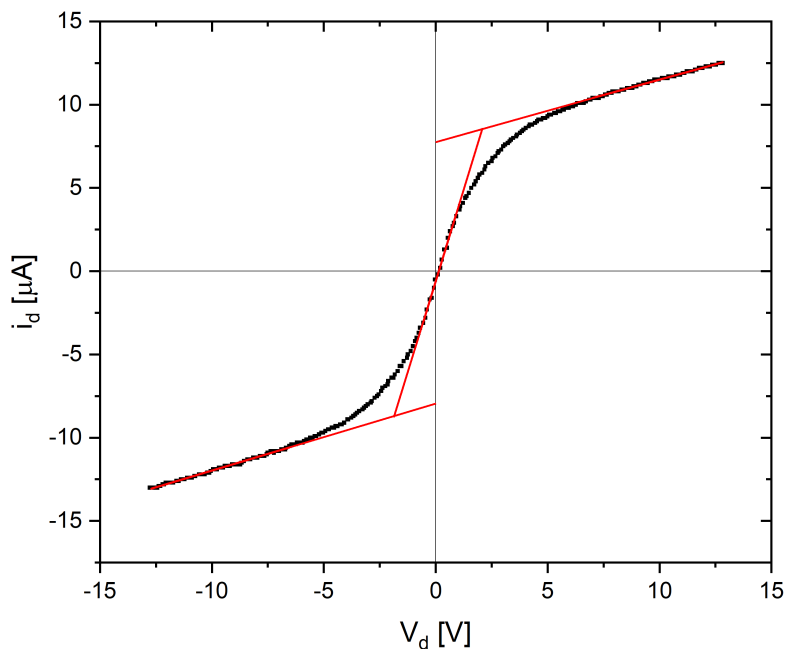
Obrázek 3: Schéma zapojení měřicí aparatury.



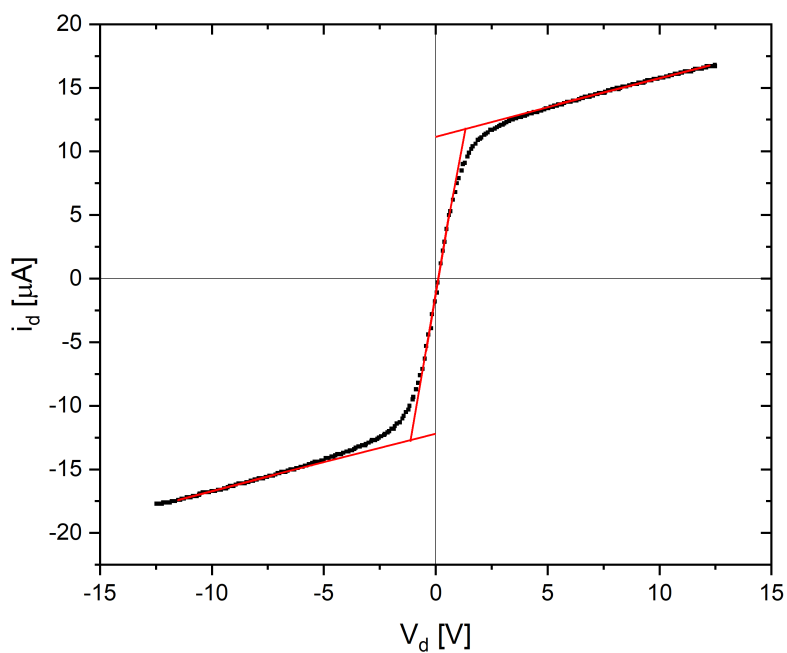
Obrázek 4: Vyhodnocení VA charakteristiky dvojné sondy.

Vyhodnocení dat provedeme podle obr. 4. Všechny tři lineární oblasti charakteristiky proložíme přímkou. Poté určíme bod α , který se nachází ve vzdálenosti $\frac{1}{5}MN$ od osy y . V bodě α 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 strmostí charakteristiky, viz rovnice (3). Zbylé veličiny, tedy i_{e2} a G spočítáme z rovnic (4), (5) a (2). Plochu dvojné sondy jsme odhadli z délky 8 mm a průměru 0,1 mm jednoduchých sond jako dvojnásobek plochy

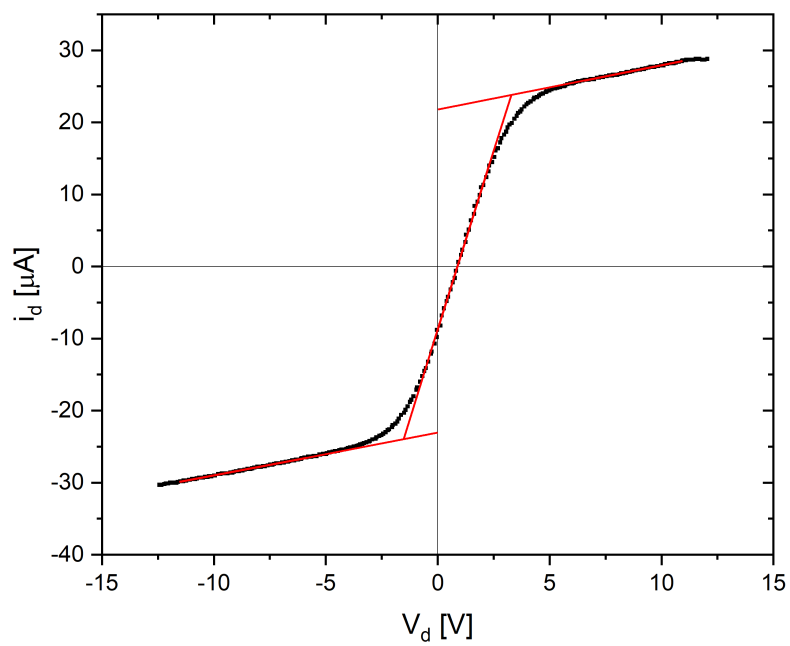
právě jedné jednoduché sondy, $S = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Pak již můžeme spočítat teplotu elektronů z rovnice (1) a koncentraci elektronů z (6), výsledky jsou v tabulce 1. Vidíme, že s rostoucím tlakem roste koncentrace elektronů. Teplota elektronů nevykazuje žádný trend. Při snížení proudu výboje za konstantního tlaku dojde ke snížení teploty i koncentrace elektronů.



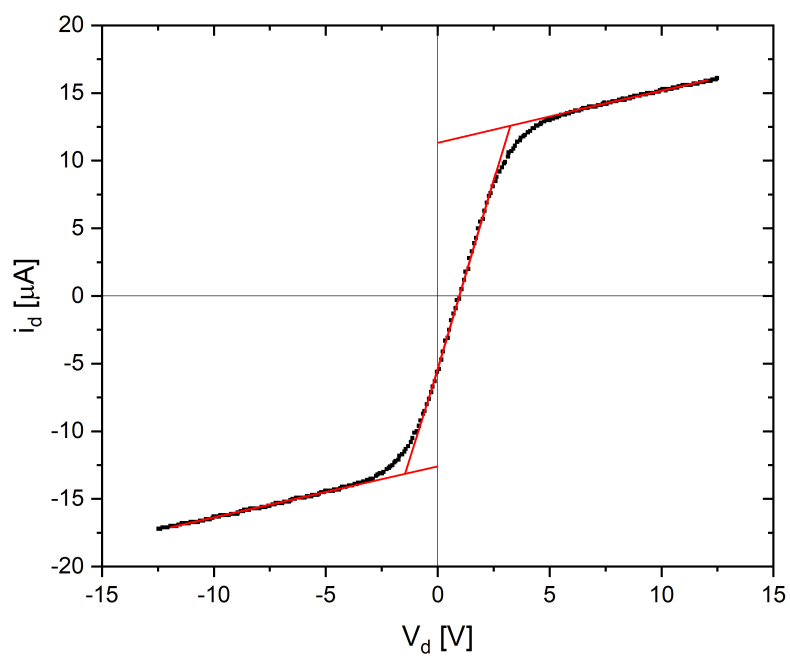
Obrázek 5: VA charakteristika za podmínek $p = 8 \text{ Pa}$, $I_v = 55 \text{ mA}$.



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



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.

Tabulka 1: Teploty 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	1,68	30	0,92	4,87
32	0,57	6,04			
160	1,00	8,96			

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 s rostoucím tlakem nevykazuje žádný trend, koncentrace elektronů však roste. Za sníženého proudu výbojem při udržování konstantního tlaku klesla teplota i koncentrace elektronů.