

PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

Studium kladného sloupce doutnavého výboje pomocí
elektrostatických sond: dvojná sonda

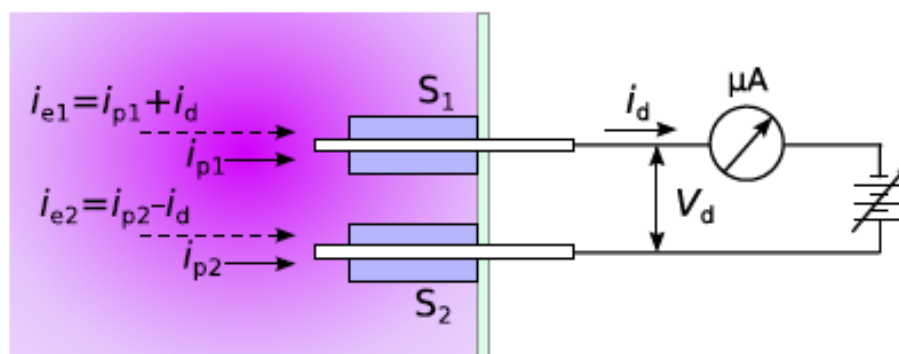
Zpracovali: Radek Horňák, Lukáš Vrána

Naměřeno: 5. 4. 2022

1 Teorie

1.1 Dvojná sonda

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.

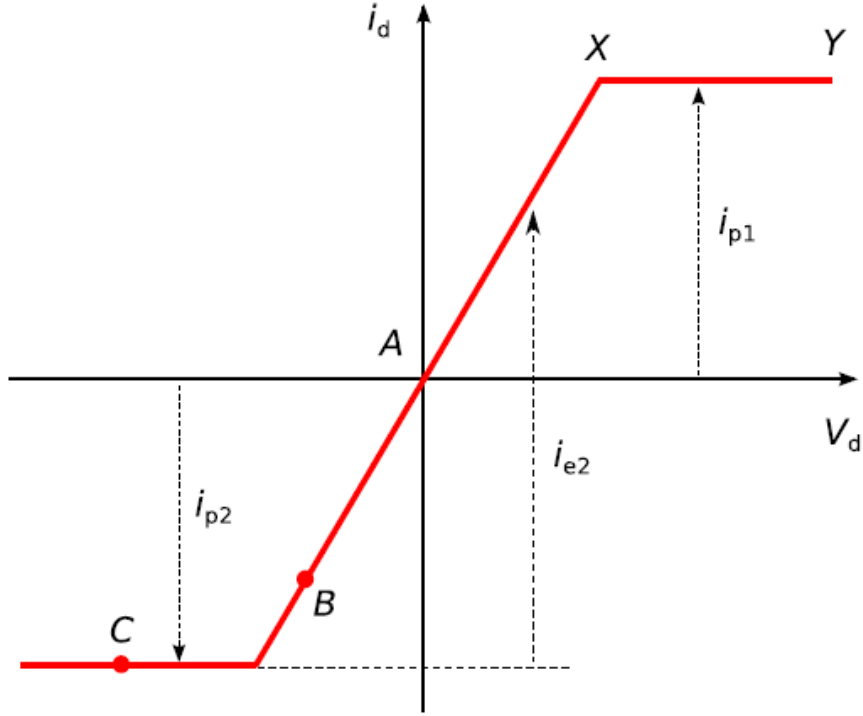


Obrázek 1: Schéma dvojité sondy.

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 témže 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 kde je velké záporné napětí. 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 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

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

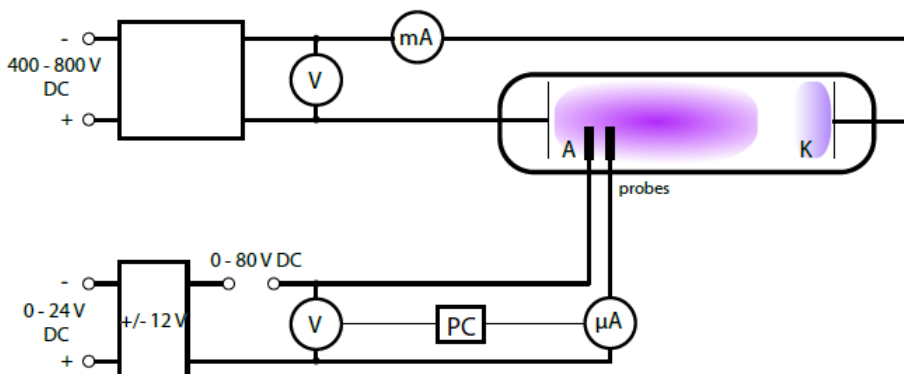
kde S je plocha sondy a $\langle v_p \rangle$ získáme jako

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

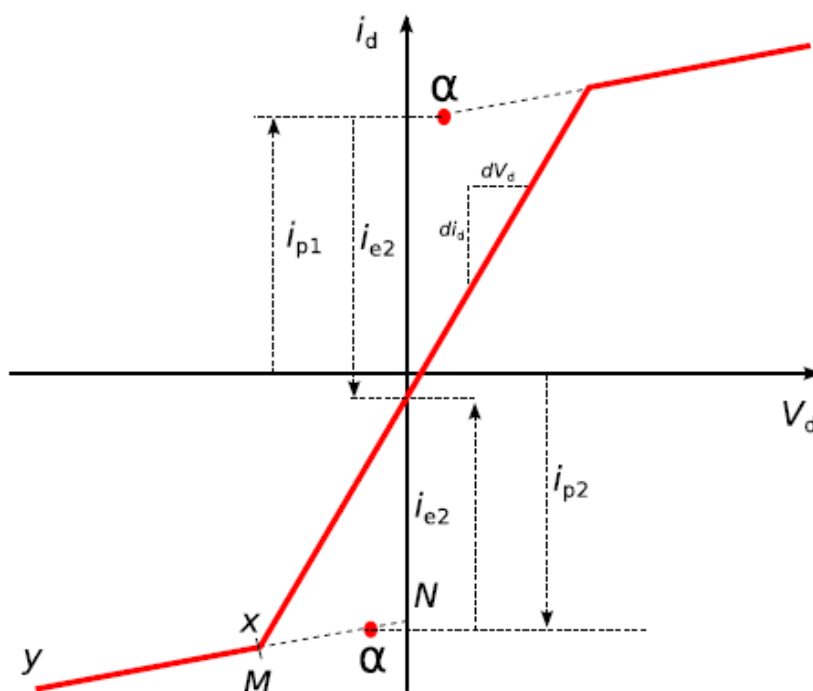
kde T_p je teplota iontů a rovná se teplotě elektronů, M je hmotnost iontu.

1.2 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 $p = 8\text{--}160$ Pa a jedno měření s odlišným proudem $I_v = 30$ mA při tlaku $p = 160$ Pa.



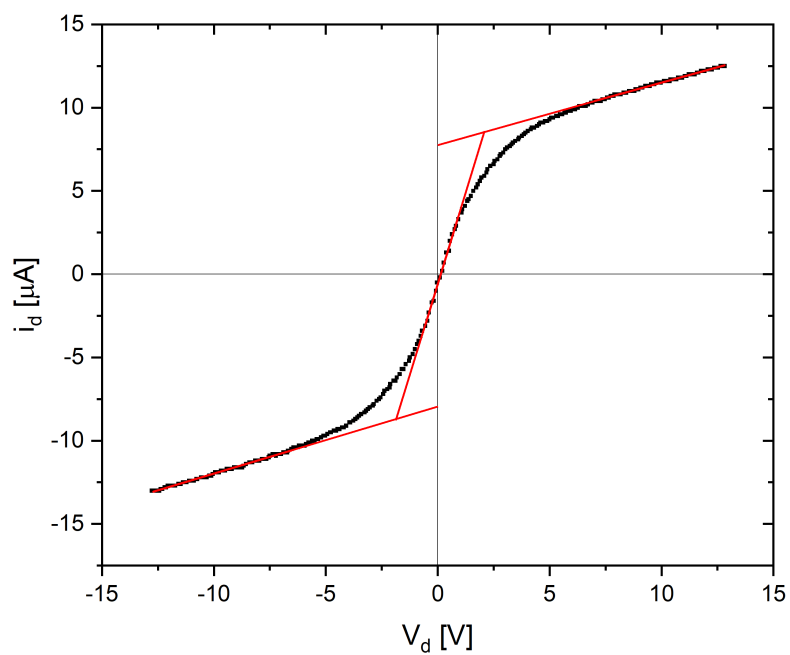
Obrázek 3: Schéma zapojení měřící aparatury.



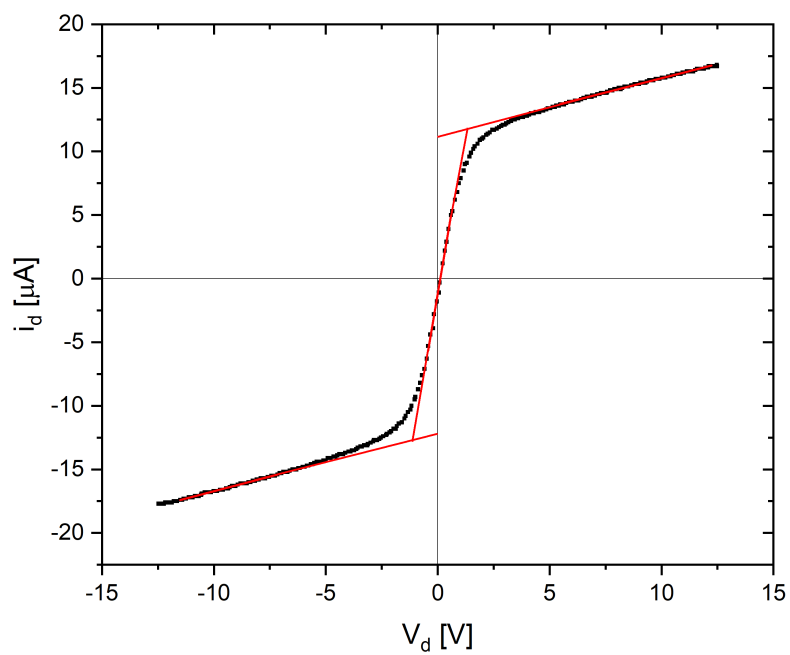
Obrázek 4: Vyhodnocení VA charakteristiky dvojné sondy.

Vyhodnocení dat provedeme podle obr. 4. Všechny tři 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 přímkou, kterou jsme proložili střední část charakteristiky, viz rovnice (3). Zbylé veličiny, tedy i_{e2} a G spočítáme z rovnic (4), (5) a (2). Plochu dvojnásobné sondy jsme odhadli z délky 8 mm a průměru 0,1 mm jednoduchých sond jako dvojnásobek plochy právě

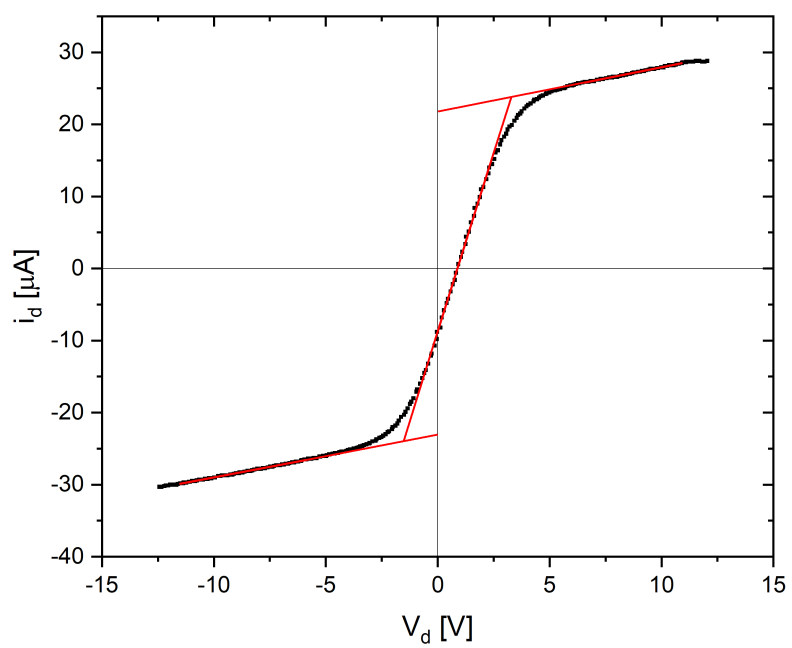
jedné jednoduché sondy, $S = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Pak již můžeme spočítat teplotu elektronů z rovnice (1) a koncentraci elektronů z (6), výsledky jsou v tabulce 1.



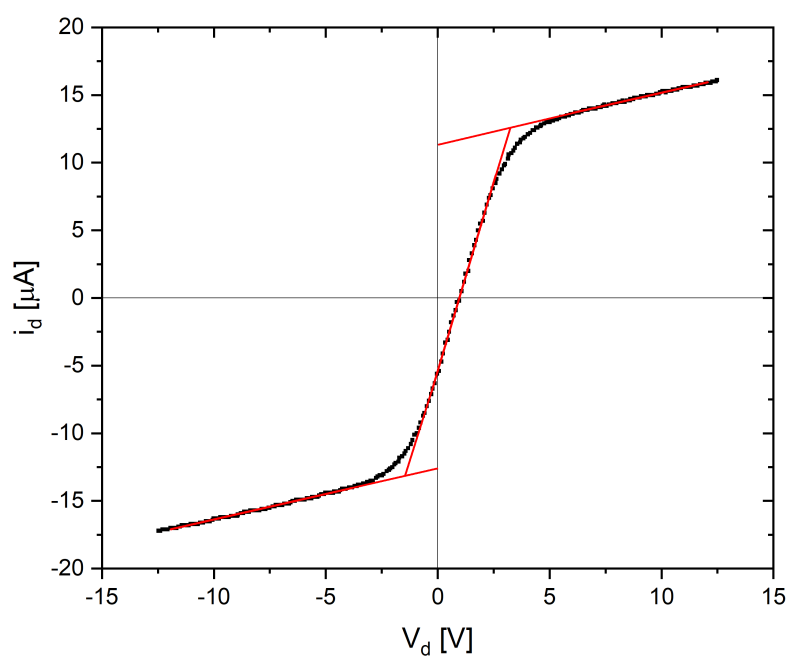
Obrázek 5: $p = 8 \text{ Pa}$, 55 mA



Obrázek 6: 32 Pa, 55 mA



Obrázek 7: 160 Pa, 55 mA



Obrázek 8: 160 Pa, 30 mA

Tabulka 1: Plovoucí a plazmové potenciály

$I_v = 55 \text{ mA}$			$p = 160 \text{ [Pa]}$		
$p \text{ [Pa]}$	$T_e \text{ [eV]}$	$n_e \text{ [} 10^{14} \text{ m}^{-3}\text{]}$	$I_v \text{ [mA]}$	$T_e \text{ [eV]}$	$n_e \text{ [} 10^{14} \text{ m}^{-3}\text{]}$
8	0,91	1,68	30	0,92	4,87
32	0,57	6,04			
160	1,00	8,96			

2 Závěr

xyxy