

PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

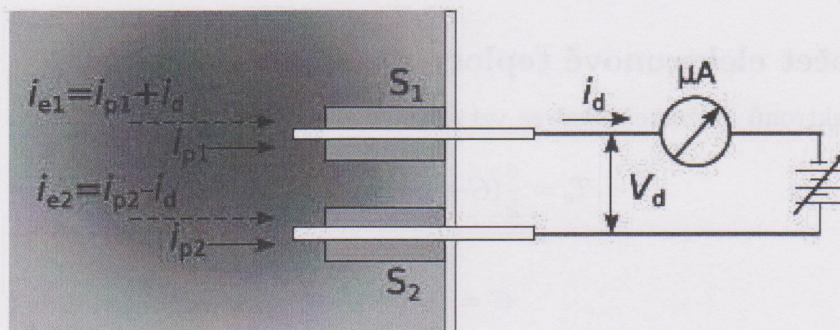
Studium kladného sloupce doutnavého výboje pomocí
elektrostatických sond: dvojná sonda

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_f . Měříme cirkulační proud i_d okruhem sond při přiloženém napětí V_d mezi ně.



Obrázek 1: Schéma dvojité sondy [1].

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_f .

$V_d < 0$ 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.

1.3 Určení koncentrace elektronů

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

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

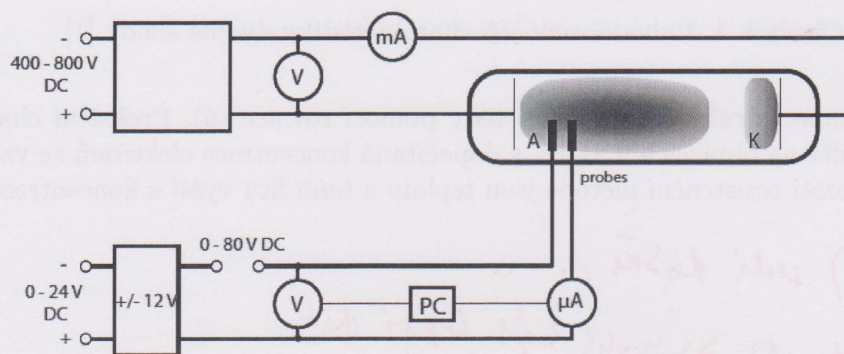
kde S je plocha sondy a $\langle v_p \rangle$ získáme jako

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

kde T_p je teplota iontů a M je hmotnost iontu.

1.4 Měření a výsledky

V našem případě měříme pomocí dvojnásobné 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 výboje $I_v = 55$ 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].

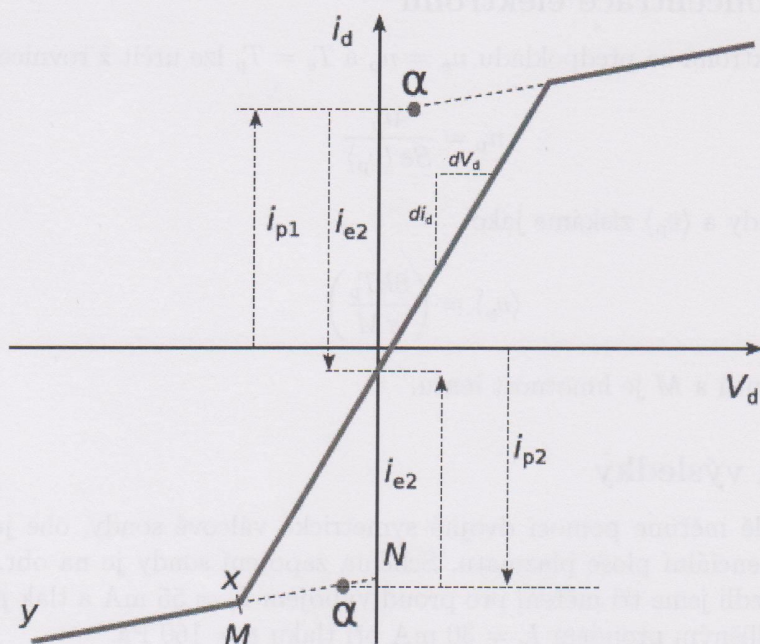
Vyhodnocení dat provedeme podle obr. 4. Všechny tři lineární oblasti charakteristik proložíme přímkou. Poté určíme bod α , který se nachází ve vzdálenosti $\frac{1}{5}MN$ od osy y . V bodě α lze určit proudy i_{p1} a i_{p2} . Proud i_d získáme jako průsečík VA charakteristiky s y osou v bodě $x = 0$. Grafy charakteristik, ze kterých odečítáme výše zmíněné veličiny, jsou na obr. 5 až 8. R_0 určíme ze směrnice přímky, kterou jsme proložili střední strmou část charakteristiky, viz rovnice (3). Zbývající 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. Tloušťka stěnové vrstvy je odhadem $d = 1$ cm.

$$S = \pi(r+d)^2 + 2\pi(r+d)l = 8,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$S = 2\pi rl$$

Zanedáme tloušťku stěnové vrstvy

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 osu. 11 a 12 S₂ moh(b₂) lepší fit

$$I = \dots (U - U_0) \dots (U + U_0) \dots$$

Ale b₂ podstatně výsledky čistely styly ± 10%