

Měření teploty a hustoty plazmatu

H. Pažoutová, E. Rosová, O. Hotový
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT
Břehová 7, 115 19 Praha 1
eva.rosova@post.cz

Abstrakt:

Práce se zabývá určením nejzákladnějších parametrů plazmatu: teploty a hustoty. K tomuto účelu bylo použito jedné z nejčastějších metod, a to měření voltampérové charakteristiky tzv. dvojité Langmuierovy sondy a její nařizování na teoretický vzorec s neznámými parametry, ze kterých se dají teplota a hustota plazmatu odvodit.

1 Úvod

Plazma je kvazineutrální plyn nabitých neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. Kolektivním chováním rozumíme pohyby, které nezávisí pouze na lokálních podmínkách (srážky), ale rovněž na stavu plazmatu ve vzdálených oblastech, kde se vytvářejí koncentrace nábojů vedoucí ke vzniku elektrických polí.

Kvazineutralita plazmatu znamená, že plazma je natolik neutrální, že můžeme hustotu iontu a elektronu považovat za stejnou ale nikoliv tak neutrální, aby se všechny elektromagnetické síly ztratily.

2 Teorie

Generování plazmatu

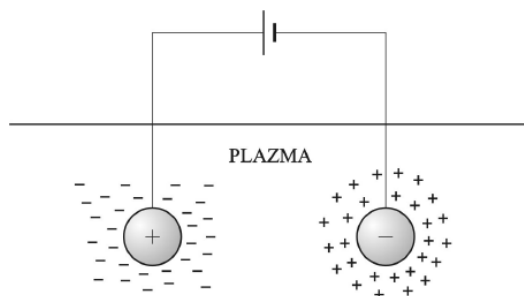
Při zahřívání plynu na velmi vysoké teploty dochází k disociaci a následné ionizaci. Neutrální plyn se mění na kvazineutrální plazma. Plazma bývá generované elektrickým výbojem (tzv. výbojové plazma). Proudem elektronů dojde ke vzniku ionizovaných částic a zvýšení teploty. Ionizované částice jsou poté udržované vnějším elektrickým polem. V našem případě se jedná o nízkotlaký doutnavý neonový výboj. Doutnavý výboj je speciálním případem samostatného výboje. Je schopný vzniknout a udržovat se bez působení ionizačního činidla, např. proudu elektronů z katody.

Langmuierova sonda

Jedná se o jednoduchý diagnostický prostředek na měření základních parametrů plazmatu. Tvoří ji vodivý materiál, např. konec drátu, přivedený do kontaktu s plazmatem. Kvůli nevyváženosti iontového a elektronového proudu dochází k akumulaci elektronů na sondě a tím k přitahování iontů. Díky tomu má povrch sondy negativní potenciál vůči potenciálu plazmatu.

Debeyovo stínění

Schopnost plazmatu odstínit elektrické potenciály do něj vložené nazýváme Debeyovým stíněním. Potenciál vložené elektrody je odstíněn změnou hustoty částic v oblasti elektrody (viz obr. 1).



Obrázek 1: Debeyovo stínění

Při měření dvojitou sondou – dvěma vodiči vloženými do plazmatu – měříme proud tekoucí sondou v závislosti na napětí mezi vodiči. Teoretický průběh VA charakteristiky je dán vztahem

$$I = I_s \frac{1 - \exp\left(\frac{V - \Delta\phi}{T}\right)}{1 + \frac{A_1}{A_2} \exp\left(\frac{V - \Delta\phi}{T}\right)} \quad (1)$$

kde I je měřený proud, V měřené napětí, $\Delta\phi$ je rozdíl potenciálů sond při nulovém proudu, I_s je iontový saturační proud, T je teplota plazmatu v eV a A_1 a A_2 jsou plochy sond.

Vzorec má dva parametry: I_s a T . Pomocí prvního určíme hustotu plazmatu, druhý udává jeho teplotu.

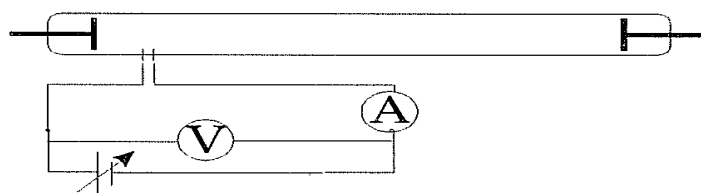
Hustotu můžeme vyjádřit ze vztahu

$$I_s = Aen_i \sqrt{\frac{KT}{m}} \quad (2)$$

kde A je povrch sondy, e je elementární náboj, n_i je hustota iontů, m hmotnost iontů, K je Boltzmannova konstanta a T je teplota plazmatu v K.

3 Měření teploty a hustoty plazmatu

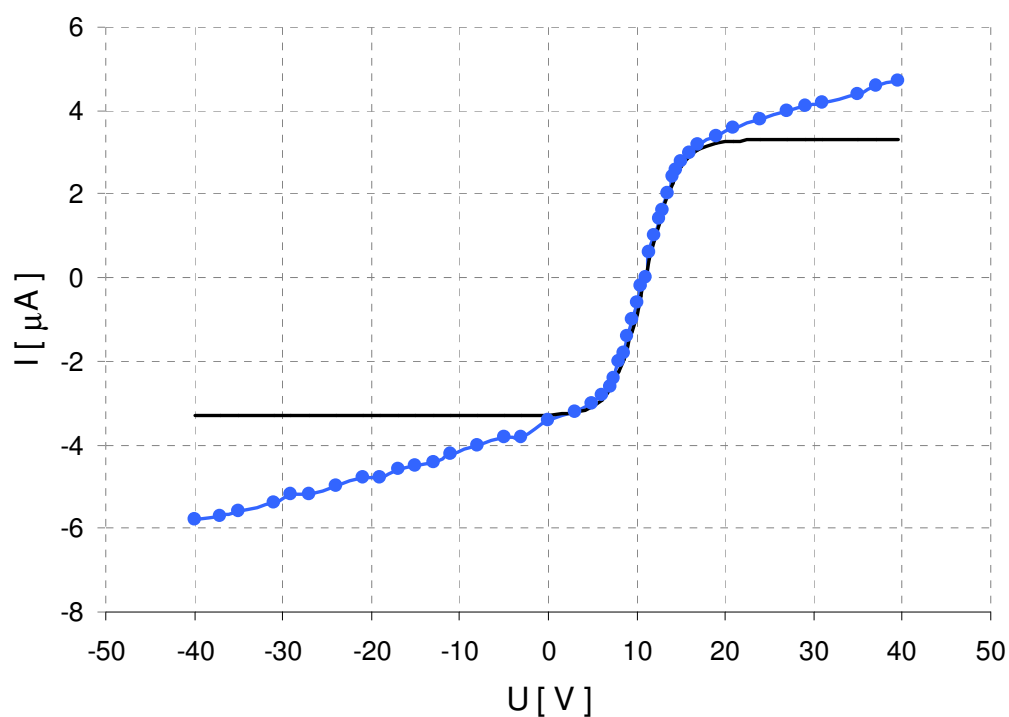
Nejdříve jsme změřili proud protékající plazmatem a rozdíl potenciálů mezi sondami bez vnějšího zdroje napětí. Odtud jsme získali velikost proudu $I = 0,8 \mu\text{A}$ a napětí $U = 9,83 \text{ V}$. Poté jsme připojili vnější zdroj napětí podle obr. 2. Napětí na zdroji jsme postupně měnili v rozsahu -40 V až $+40 \text{ V}$ a měřili votampérovou charakteristiku plazmatu, resp. závislost proudu protékajícího sondou na napětí přiváděném na sondu. Při potenciálu sondy 11 V klesl proud protékající sondou na nulu. Napětí 11 V tedy považujeme za potenciál plazmatu $\Delta\phi$ mezi dráty sondy. Naměřené hodnoty napětí a proudu jsou uvedeny v tabulce 1. K určení teploty a hustoty plazmatu je potřeba aproximovat naši VA charakteristiku teoretickým průběhem podle vztahu (1). Naměřená voltampérová charakteristika s aproximací je graficky znázorněna v grafu.



Obrázek 2: Experimentální uspořádání

Číslo měření	U [V]	I [μ A]	Číslo měření	U [V]	I [μ A]	Číslo měření	U [V]	I [μ A]	Číslo měření	U [V]	I [μ A]
1	-40,0	-5,8	13	-11,0	-4,2	25	9,0	-1,40	37	15,0	2,80
2	-37,0	-5,7	14	-8,0	-4,0	26	9,5	-1,00	38	16,0	3,00
3	-35,0	-5,6	15	-5,0	-3,8	27	10,0	-0,60	39	17,0	3,20
4	-31,0	-5,4	16	-3,0	-3,8	28	10,5	-0,20	40	19,0	3,40
5	-29,0	-5,2	17	0,0	-3,40	29	11,0	0,00	41	21,0	3,60
6	-27,0	-5,2	18	3,0	-3,20	30	11,5	0,60	42	24,0	3,80
7	-24,0	-5,0	19	5,0	-3,00	31	12,0	1,00	43	27,0	4,00
8	-21,0	-4,8	20	6,0	-2,80	32	12,5	1,40	44	29,0	4,10
9	-19,0	-4,8	21	7,0	-2,60	33	13,0	1,60	45	31,0	4,20
10	-17,0	-4,6	22	7,5	-2,40	34	13,5	2,00	46	35,0	4,40
11	-15,0	-4,5	23	8,0	-2,00	35	14,0	2,40	47	37,0	4,60
12	-13,0	-4,4	24	8,5	-1,80	36	14,5	2,60	48	39,5	4,70

Tabulka 1: VA charakteristika plazmatu



Obrázek 3: Graf VA charakteristiky plazmatu

Pro určení hustoty plazmatu n_i podle vztahu (2) potřebujeme znát také povrch sondy A. Ten jsme odhadli na $A = 21 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ (odhad délky $l = 0,8 \text{ cm}$ a průměru $d = 0,8 \text{ mm}$). Fitováním teoretického průběhu tedy dostáváme tyto hodnoty:

$$T = 1,8 \text{ eV} = 28\,800 \text{ K}$$

$$I_s = 3,3 \text{ } \mu\text{A}$$

$$n = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-3}$$

5 Shrnutí

Porovnáním naměřené voltampérové charakteristiky s teoretickou závislostí proudu na napětí Langmuierovy sondy jsme určili tyto parametry plazmatu:

$$\text{teplota plazmatu } T = 1,8 \text{ eV}$$

$$\text{hustota } n = 2,8 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-3}$$

Srovnáním naměřené VA charakteristiky s teoretickým průběhem si všimneme, že při saturaci vykazuje plazma ještě nějakou nepatrnou vodivost. Saturační proud tedy nezůstává konstantní se změnami napětí, jak předpokládá teorie.

Změřili jsme také proud protékající plazmatem a rozdíl potenciálů mezi sondami bez vnějšího zdroje napětí. Odtud jsme získali velikost proudu $I = 0,8 \text{ } \mu\text{A}$ a napětí $U = 9,83 \text{ V}$.

Poděkování

Závěrem bychom rádi poděkovali všem, kteří nám umožnili provést toto zajímavé měření. Zejména Ing. Svobodovi za cennou pomoc a konzultace.

Reference:

[1] F. F. Chen, Úvod do fyziky plazmatu, Academia, Praha, 1994

[2] J. Kracík, J. B. Slavík, J. Tobiáš, Elektrické výboje, SNTL Praha, 1964