

Základní experiment fyziky plazmatu

D. Vašíček¹, R. Skoupý², J. Šupík³, M. Kubič⁴

¹ Gymnázium Velké Meziříčí, david.vasicek@centrum.cz

² Gymnázium Ostrava-Hrabůvka příspěvková organizace, jansupik@gmail.com

³ Gymnázium Bystřice nad Pernštejnem, radim88@seznam.cz

⁴ Supervisor, FJFI-ČVUT, Praha

Abstrakt:

V tomto miniprojektu jsme se zabývali základními vlastnostmi plazmatu, které jsme měřili pomocí dvojité Langmuierovy sondy. Plazma vznikalo v neonové trubici připojené na vysoká napětí 850V a 1kV pod extrémně nízkým tlakem. Také nás zajímalo jestli je teplota plazmatu uvnitř doutnavého výboje vyšší než na povrchu Slunce. Došli jsme k závěru, že teplota uvnitř neonové výbojky je opravdu mnohonásobně vyšší.

Úvod

Předpokládá se, že 99% známé hmoty ve vesmíru je ve formě plazmatu. Plazmatem je tvořeno nitro i obálky hvězd, mlhovin atd. Na Zemi se s plazmatem setkáváme v kanálech blesků, v ionosféře, v podobě slunečního větru, který neustále atakuje magnetické pole Země, a samozřejmě plazma nalezneme v laboratořích výzkumných ústavů.

Plazma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. Tím se rozumí, že plazma je schopno jako celek svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na takováto globální pole reagovat. Chování plazmatu je tak ovlivněno především elektrickými a magnetickými poli.

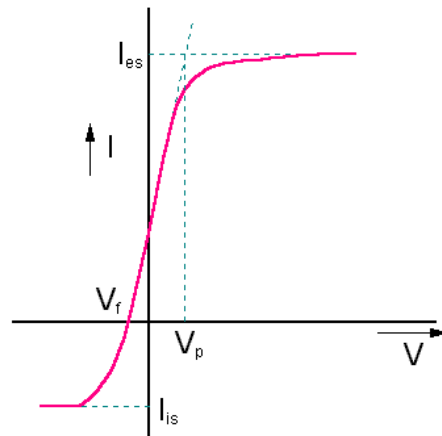
Nyní definujeme přesněji pojmy „kolektivní chování“ a „kvazineutralita“.

- *Kolektivní chování* – tímto pojmem rozumíme pohyby částic, které nezávisí pouze na lokálních podmínkách, ale rovněž na stavu plazmatu ve vzdálených oblastech.
- *Kvazineutralita* – při svém pohybu tvoří nabitě částice lokální koncentrace pozitivního nebo negativního náboje, které vedou ke vzniku elektrických polí, přesto se celek chová navenek jako neutrální. [1]

Doutnavý výboj nastává v plynu za nízkého tlaku, zhruba 1 Pa - 1000 Pa. Má-li plyn nízký tlak, obsahuje méně molekul a ty se tedy méně často srážejí. Proto, máme-li v plynu nějaký iont nebo elektron, stačí relativně malé napětí (cca. 350 V) k tomu, aby získal energii dostatečnou k ionizaci molekuly, na kterou narazí (může se urychlovat po poměrně dlouhé dráze). Tak již při poměrně nízkém napětí nastává výboj v poměrně dlouhé trubici. [2]

Teorie

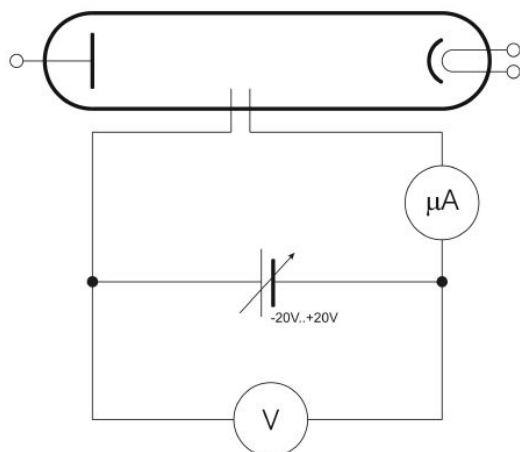
Langmuierova sonda je řazena mezi aktivní diagnostiky, které přicházejí do přímého kontaktu s plazmatem. Proto je lze aplikovat pouze na okraj plazmatu, kde nejsou tak vysoké teploty. Langmuierova sonda umožňuje měření elektronové teploty a hustoty v relativně chladném plazmatu. Sondou samotnou jsou malé kovové elektrody. Při měření sledujeme V-I charakteristiku (viz Obr.1).



Obr.1: V-I charakteristika jednoduché Langmuierovy sondy

Pokud vložíme do plazmatu jednoduchou sondu se záporným potenciálem V proti potenciálu plazmatu V_p , shromáždí se okolo ní kladné ionty, které vytvoří stínící vrstvu kladného náboje. Pokud je potenciál sondy velmi záporný, odrážejí se všechny elektrony zpět do plazmatu a na sondu dopadají pouze kladné ionty a proud se saturuje. Tento proud nazýváme *iontový saturační proud* I_{is} . Zvýšíme-li potenciál sondy, část elektronů, které překonají odpuzivý účinek elektrického pole, dopadá na sondu a přispívá k exponenciálnímu nárůstu záporného proudu. Dalším navyšováním napětí můžeme dosáhnout toho, že celkový proud bude nulový – tomuto bodu odpovídá *plovoucí napětí* V_f . Zvýšením napětí na sondě na hodnotu V_p bude elektronový proud naprosto dominantním nad iontovým proudem. Každý další nárůst napětí jednoduše zvýší energii elektronů, ale ne velikost proudu – *elektronový saturační proud* I_{es} . Je třeba zdůraznit, že toto je ideální volt-ampérová charakteristika. Nebrali jsme vůbec v úvahu „narušující“ procesy jako bombardování sondy vysoko-energetickými elektrony a emisi sekundárních elektronů ze sondy. [1]

Při měření dvojitou sondou – dvěma elektrodami vloženými do plazmatu – měříme proud tekoucí sondou v závislosti na napětí mezi elektrodami. Charakteristika je podobná jako v případě jednoduché sondy. Vlivem lokálního elektrického pole však dojde k jejímu posuvu. Schéma zapojení pro měření s dvojitou Langmuierovou sondou je na Obr.2.



Obr.2: Schéma zapojení pro měření s dvojitou Langmuierovou sondou

Teoretický průběh V-I charakteristiky je dán vztahem

$$I = I_s \cdot \frac{1 - e^{\frac{V - \Delta\phi}{T}}}{1 + \frac{A_1}{A_2} e^{\frac{V - \Delta\phi}{T}}} \quad I_s = A e n_i \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad (1)$$

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

Vzorec (1) má dva parametry I_s a T . Pomocí prvního můžeme určit hustotu plazmatu n_i , 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. [1]

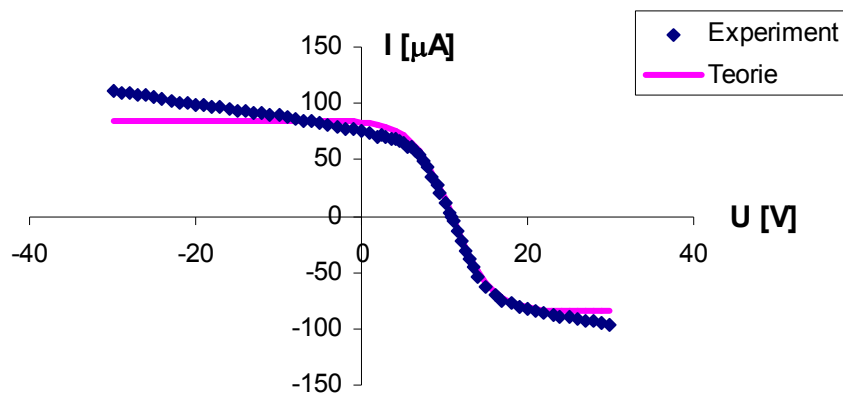
Výsledky měření

Provedli jsme dvě měření s nízkotlakou neonovou trubicí. Nejprve s napětím na elektrodách 850V, podruhé s napětím 1kV. U prvního měření jsme postupovali po 1V v intervalu (-30;30) voltů přivedených na Langmuierovu dvojitou sondu. V místech velkého posuvu byl použit krok po 0,5V. U druhého měření jsme postupovali obdobně jako u předešlé úlohy.

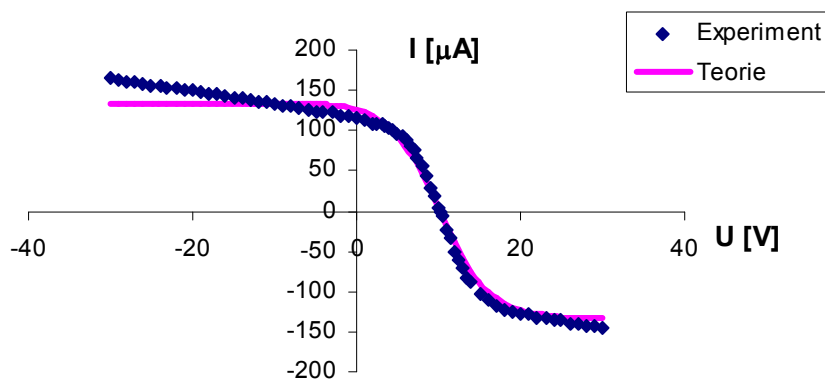
Z naměřených hodnot proudu a napětí jsme sestavili volt-ampérovou charakteristiku dvojitě Langmuierovy sondy a porovnali jsme ji s ideální volt-ampérovou charakteristikou (*Graf1*). Na základě výpočtů, se zpětnou změnou parametrů n_i a T , jsme zjistili odpovídající hodnotu teploty a hustoty pro danou charakteristiku.

	T [eV]	T [K]	n_i [m^{-3}]
Při 850 V	2,4	27 840	$7,8 \cdot 10^{15}$
Při 1kV	3,0	34 800	$1,1 \cdot 10^{16}$

Tab.1: Výsledná teplota a hustota plazmatu



Graf 1: V-I charakteristika při zdrojovém napětí 850 V



Graf 2: V-I charakteristika při zdrojovém napětí 1 kV

Shrnutí

Během experimentu jsme měřili vlastnosti plazmatu pomocí dvojité Langmuierovy sondy. Výsledky jsme porovnali s vypočtenými hodnotami, na jejichž základě jsme určili přibližnou teplotu a hustotu plazmatu. Došli jsme k závěru, že uvnitř doutnavého výboje je mnohonásobně vyšší než na povrchu Slunce. Při měření nám vyšlo, že teplota vzrůstá z 2,4 eV (při 850 V) na 3 eV (při 1kV). A hustota z $7,8 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$ na $1,1 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Dosažené hodnoty se liší od tabulkových v důsledku nepřesného měření povrchu sond a nestálosti proudu mezi sondami, obzvláště v saturačních oblastech.

Poděkování

Poděkování všem kteří se účastnili organizování Fyzikálního týdne, zejména našemu supervizorovi M. Kubičovi.

Reference:

[1] <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.html> (cit. červen 2008)

[1] http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/svitime/dout_vyb.html (cit. červen 2008)

[1] F F Chen: Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 1974,1984 Plenum Press, české vydání Úvod do fyziky plazmatu, Academia, Praha 1984