

VPLYV CHLADIACEJ VRSTVY PLYNU NA GEOMETRICKÉ ROZMERY INDUKČNEJ PLAZMY

MIRON MEDVID*, Košice

Skrátnali sme závislosť polomeru a výšky indukčnej plazmy od prietoku a spôsobu prívodu chladiaceho plynu do priestoru výbojovej trubice. Na základe experimentálnych snímok výboja sme určili rovnice na výpočet plochy povrchu plazmy pri tangenciálnom a axiálnom prúde plynu. Plazmu sme získali v argónovom prostredí za atmosférického tlaku, keď výkon a frekvencia zdroja počas experimentu zostávali konštantné.

I. ÚVOD

V súčasnosti sa na výpočet parametrov vysokofrekvenčného elektrického výboja používa zjednodušený model indukčnej plazmy [1, 2]. V práci [3] sa výkon plazmy a spotreba plynu určujú za predpokladu, že výboj predstavuje homogénny stĺpec, t. j. plocha povrchu plazmy F_0 je vypočítaná pomocou vzťahu

$$F_0 = 2\pi r_0 l_0,$$

kde r_0 a l_0 predstavujú polomer a výšku plazmy.

V skutočnosti tvar indukčnej plazmy je odlišný od modelu plazmového stĺpca a v podstatnej miere závisí od výkonu zdroja [4], frekvencie generátora [2], tlaku a druhu použitého plynu [5].

Vzhľadom na to, že prívod energie do indukčného výboja sa uskutočňuje v dôsledku difúzie magnetického poľa, je nevyhnutné určiť jeho vplyv na geometrické rozmery plazmy. Pre prípad vysokofrekvenčného indukčného výboja cyklotrónovú frekvenciu elektrónov ω_e a čas preletu medzi dvoma po sebe nasledujúcimi zrážkami elektrónov s iónami plynu τ_{ei} určíme z týchto rovníc [6, 7]

$$\omega_e = eH/m_e c,$$

* Vysokum plochov a laboratória VSŽ, KOŠICE, VSŽ — vstupný areál.

$$\tau_{ei} = 1/v_e (N_0 Q_{ei} + N_i Q_{ie}),$$

kde $v_e = (3kT/m_e)^{1/2}$ — stredná tepelná rýchlosť elektrónov, Q_{ei} — zrážkový prierez elektrónu a atómu, Q_{ie} — zrážkový prierez iónu a elektrónu, N_i , N_0 — koncentrácia iónov a neutrálnych častíc plazmy.

V plazme indukčného výboja, ktorá vzniká v argónovom prostredí za atmosférického tlaku pri teplote $\sim 8 \times 10^3$ K, maximálna hodnota intenzity magnetického poľa $H_{\max} \approx 10^3$ A/m [3], $Q_{ie} \approx 10^{-18}$ m², $Q_{ei} \approx 2,4 \times 10^{-19}$ m² [7], potom $\omega_e \approx 10^8$ s⁻¹ a $\tau_{ei} \approx 10^{-11}$ s. Z uvedených približných výpočtov vyplýva, že pre vysokofrekvenčnú indukčnú plazmu je splnená podmienka [3]

$$\omega_e \tau_{ei} \ll 1,$$

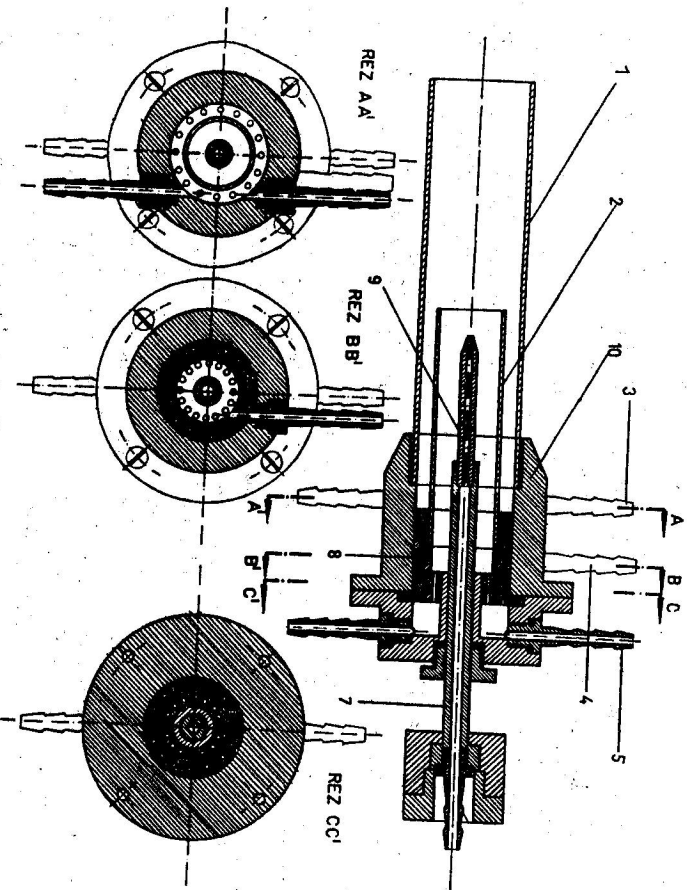
t. j. elektróny a ióny nestacia obeltnúť po kružnici plyň cyklus dráhy medzi jednotlivými zrážkami, keďže v plazme pri atmosférickom tlaku pravidelné odčítanie nábojov neustále narušuje Coulombove vzájomné pôsobenie častíc. Tlak magnetického poľa na plazmu indukčného výboja je preto zanedbateľný.

Zostáva ešte možnosť pôsobenia magnetického poľa na plazmu ako celok, t. j. možnosti vzniku Θ pincha. Pre vysokofrekvenčnú indukčnú plazmu približných parametrov tento tlak bol určený v práci [8] pomocou rovnice, ktorá vyjadruje čas ambipolárnej difúzie elektrónu smerom k osi výboja pri danom tlaku magnetického poľa. Približné výpočty ukázali, že pre vysokofrekvenčný indukčný výboj pôsobenie magnetohydrodynamických síl prakticky neexistuje.

Vzhľadom na to, že geometrické rozmery zariadenia, výkon a frekvencia generátora počas experimentu zostávali konštantné, geometrické rozmery plazmy sú závislé len od prietoku a spôsobu prívodu plynu do priestoru výbojovej trubice.

II. OPIS EXPERIMENTU

Indukčnú plazmu sme získali vo vnútornom priestore kremennej rúrky o priemere 38 mm v argónovom prostredí za atmosférického tlaku. Použitie zariadenie (obr. 1) sa skladá z dvoch rúrok, ktoré sú nasadené do medenej hlavice 10. Prstencovitý priestor utvorený kremennými rúrkami 1 a 2 je spojený s prívodom plynu pozdĺž osi rúrky 5 a 6 a tangenciálnym prívodom 3. Prídanie plynu do vnútorného priestoru rúrky 2 sa zabezpečovalo cez medený valec 8 tangenciálne 4 alebo axiálne 5. Na kremennú rúrku sme nasadili šesťzávitový induktor o priemere 50 mm a výške 76 mm, ktorý bol pripojený na vysokofrekvenčný generátor. Induktor sme vyhotovili z hliníkovej rúrky o priemere 8 mm, odpor 0,023 Ω a indukčnosť 1,4 μ H.



Obr. 1. Konštrukcia experimentálneho zariadenia.

Indukčný výboj vznikol za tangenciálneho a axiálneho prúdenia plynu ($\text{Ar} = 99,99\%$, $\text{N}_2 < 0,01\%$, $\text{O}_2 = 210$ ppm) pri výkone generátora $\sim 2 \times 10^3$ W a frekvencii $3,5 \times 10^6$ Hz. Teplota plazmy v centrálny oblasti výboja dosahovala $\sim 8 \times 10^3$ K a vysokofrekvenčné napätie na induktore pri vzniku plazmy $1,6 \times 10^3$ V.

Meranie geometrických rozmerov indukčnej plazmy sme robili fotografovaním výboja cez tenký filter rovnobežne a kolmo s osou induktora. Negatívne zobrazenie výboja na mikrofilmovom filme sme vyhodnocovali pomocou mikrofotometra MF-4. Najvhodnejšie negatívny na meranie intenzity sme získali pri expozícii $1/250-1/500$ s a dione $1:2,8-1:4$. Rovnicu krivky povrchu plazmy sme získali pomocou zväčšených snímkov výboja, priemer a výšku plazmy sme určovali vo výške 0,1 od maximálnej intenzity žiarenia výboja.

III. VÝSLEDKY MERANIA

Experimentálne výsledky merania geometrických rozmerov indukčného výboja ukázali, že polomer, výška, poloha a tvar plazmy závisia od rýchlosti

prúdenia a spôsobu prívodu plynu do priestoru výbojovej trubice. Tvar a poloha plazmy pri rozličných prietokoch za tangenciálneho a axiálneho prúdenia chladiaceho plynu sú znázornené na obr. 2, 3 a experimentálne údaje o zmene polomeru a výšky plazmy sú uvedené v tab. 1.

Zmenšenie polomeru plazmy pri zvyšovaní prietoku je charakteristické pre tangenciálny prívod a je spôsobené zväčšením rýchlosti a hrúbky vrstvy plynu. Pri zmene prietoku ($10-45$) $\times 10^{-5}$ m³/s priemer plazmy predstavuje $0,8-0,6$ priemeru výbojovej rúrky. V prípade axiálneho prúdenia polomer plazmy sa mierne zväčšuje v dôsledku radálneho rozdelenia tlaku. Pri zvyšovaní prietoku výška plazmy sa mení aj v závislosti od spôsobu prívodu plynu a približne sa rovná výške induktora.

Plochu povrchu plazmy sme určovali podľa zväčšených snímkov výboja. Zistili sme, že pre použitú konštrukciu zariadenia a uvedené spôsoby prúdenia plynu plazma má tvar šľučky alebo elipsy, ale najčastejšie je to kombinácia týchto kriviek

$$9a_1y^2 = x(3a_1 - x)^2,$$

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \text{ pri } a > b.$$

Plochu povrchu plazmy F_0 určíme rotáciou uvedených kriviek okolo osi X, dostaneme

$$F_0 = \frac{4\pi b}{a} \int_0^a (a^2 - x^2)^{1/2} dx + 2\pi \int_0^{3a_1} \frac{3a_1 - x}{6a_1} (a_1^2 + 2a_1x + x^2)^{1/2} dx,$$

kde

$$e = \frac{(a^2 - b^2)^{1/2}}{a} = \frac{c}{a}.$$

Keď pokladáme $ex = a \sin t$, potom

$$t_1 = 0 \quad \text{pri } x = 0,$$

$$t_2 = \arcsin e \quad \text{pri } x = a,$$

$$F_0 = \frac{2\pi ab}{e} \int_0^{\arcsin e} (1 + \cos 2t) dt + \frac{\pi}{3a_1} \int_0^{3a_1} (3a_1^2 + 2a_1x - x^2) dx,$$

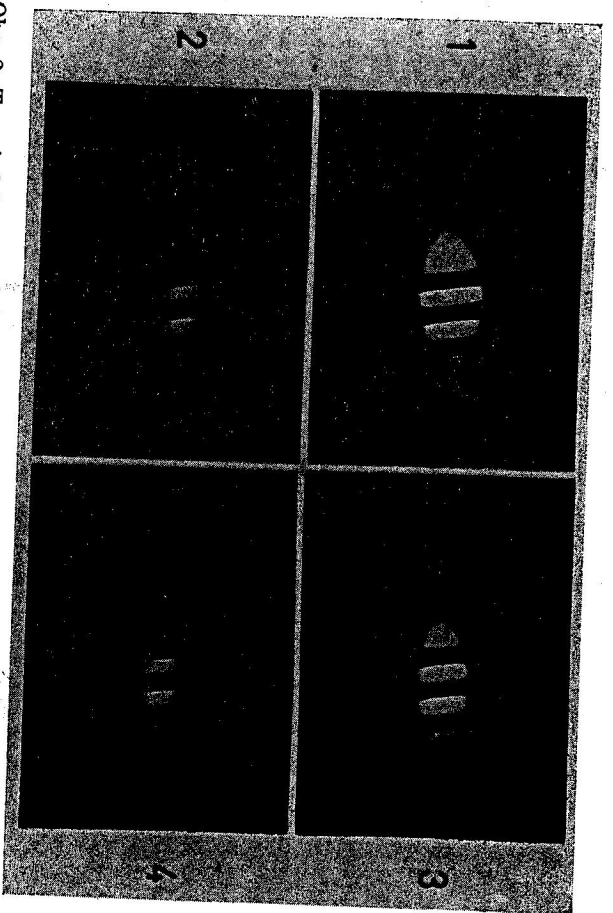
Tabulka 1

| $\omega = 3,5 \text{ MHz};$ | | $R_0 = 38 \times 10^{-2} \text{ m};$ | | $L_1 = 76 \times 10^{-2} \text{ m}$ | | |
|---|-----------------------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------|--|
| $G \times 10^{-5}$ [$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$] | Tangenciálne prúdenie | | Axiálne prúdenie | | | |
| | $\frac{r_0}{R_0}$ | $\frac{l_0}{L_1}$ | $F_0 \times 10^{-4}$ [m^3] | $\frac{r_0}{R_0}$ | $\frac{l_1}{L_1}$ | $F_0 \times 10^{-4}$ [m^3] |
| 12,5 | 0,41 | 0,99 | 59,45 | 0,35 | 0,75 | 40,55 |
| 21,3 | 0,38 | 0,96 | 46,55 | 0,37 | 0,76 | 43,08 |
| 33,0 | 0,34 | 0,95 | 43,91 | 0,38 | 0,76 | 44,31 |
| 46,0 | 0,32 | 0,89 | 37,46 | 0,38 | 0,86 | 44,23 |

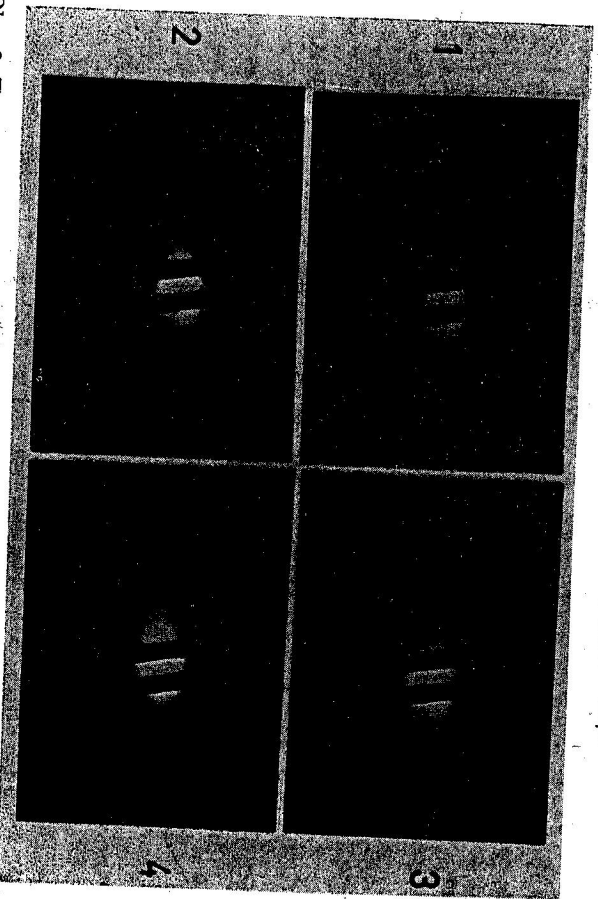
alebo

$$F_0 = 2\pi b \left(b + \frac{a}{e} \arcsin \varepsilon \right) + 3\pi a_1^2.$$

V pravej časti poslednej rovnice prvý sčítanec predstavuje rotačnú plochu $1/2$ elipsy a druhý rotačnú plochu celej slučky. Závislosť plochy povrchu indukčnej plazmy od prietoku pre obidva spôsoby prúdenia plynu je znázor-
nená na obr. 4. Z grafu na obr. 4 vidieť, že za tangenciálneho prúdenia plocha

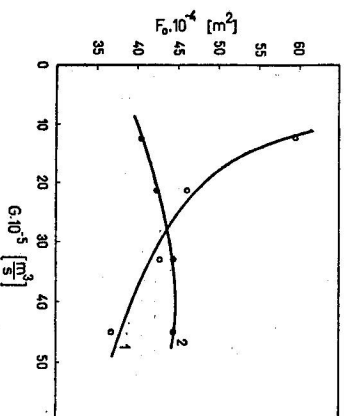


Obr. 2. Tvar indukčnej plazmy pri rozličných prietokoch za tangenciálneho prúdenia plynu. (1—12,5; 2—33,0; 3—38,3; 4—46,0) $\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.



Obr. 3. Tvar indukčnej plazmy pri rozličných prietokoch za axiálneho prúdenia plynu. (1—12,5; 2—33,0; 3—38,3; 4—46,0) $\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Obr. 4. Závislosť plochy povrchu indukčnej plazmy od prietoku za tangenciálneho (1) a axiálneho (2) prúdenia plynu.



povrchu plazmy sa znižuje pri zvyšovaní prietoku plynu. Plocha plazmy vzhľadom na induktor sa podstatne nemení, ale plameň výboja sa znižuje. Excentricita elipsy sa pohybuje v intervale 0,82—0,94 a dĺžka slučky je 50—34 mm. V prípade axiálneho prúdenia plocha povrchu plazmy sa zväčšuje len do prietoku $\sim 30 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Poloha plazmy vzhľadom na induktor sa podstatne nemení, plameň plazmy sa zväčšuje a maximálna intenzita žiarenia výboja je v blízkosti druhého závitu induktora.

Vzhľadom na to, že merania geometrických rozmerov sme robili fotografovaním výboja a snímkou sme vyhodnotili mikrofotometricky, prenosť určenia rozmerov plazmy je $\sim 2\%$.

IV. ZÁVER

Z experimentálnych výsledkov vyplýva, že pri tangenciálnom prúde rýľu so zväčšením prietoku, priemer a plocha povrchu plazmy sa znižujú a v prípade axiálneho prúdenia zväčšujú. Za tangenciálneho prívodu rýľu, zväčšovanie prietoku ($10-45$) $\times 10^{-5}$ m³/s spôsobuje, že priemer plazmy predstavuje 0,8—0,6 priemeru výbojovej trubice. V prípade axiálneho prúdenia priemer plazmy sa zväčšuje a výška plazmy približne zodpovedá dĺžke induk-tora.

LITERATÚRA

- [1] Бажберг Е. А., Дресвин С. Е., Ж. техн. физ. 33 (1963), 65.
- [2] Дымшин Е. М., Корецкий И. Е., Ж. техн. физ. 34 (1964), 1677.
- [3] Райзер И. П., ПМТФ, май — июн (1968), 3.
- [4] Белогусова Л. Е., Теплофизика высоких температур 4 (1966), 499.
- [5] Ровинский Р. Е., Белогусова Л. Е., Груздев В. А., Теплофизика высоких температур 4 (1966), 328.
- [6] Франк-Каменецкий Д. А., Лекции по физике плазм. Атомиздат, Москва 1964.
- [7] Излучение и исследование высокотемпературной плазмы. Изд. иностран. литературы, Москва 1962.
- [8] Сошников В. Н., Трехов Е. С., Теплофизика высоких температур 4 (1966), 166. Дošло 29. 12. 1970

INFLUENCE OF COOLING GAS LAYER ON THE GEOMETRIC SIZES OF INDUCTION PLASMA

Miron Medvid

Summary

The dependence of radius and height of induction plasma on the flow and the way of supply of cold gas into the discharge tube is studied. Equations for the calculation of plasma surface area during tangential and axial flow are stated on the base of discharge experimental photos. Plasma is obtained in argon atmosphere at atmospheric pressure with constant power and frequency of the source during experiment.