

Studium rozpadu plazmatu mikrovlnnou metodou

Plazma je stav hmoty, kdy se v látce vyskytují kromě neutrálních částic též částice nabitě: elektrony a ionty. Důležitou charakteristikou plazmatu je pak jejich koncentrace:

n_e ... elektrony

n_i^+ ... kladné ionty

n_i^- ... záporné ionty

Pro udržení plazmatu je nutné dodávat energii. Přerušíme-li přívod energie, plazma se začne rozpadat. To se projeví postupným klesáním koncentrace nabitých částic. Tento pokles je způsoben dvěma principiálními procesy:

- **difúze** a následná rekombinace na stěnách
- objemová **rekombinace**

Difúze

Vyjděme z rovnice kontinuity

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{\Phi} = 0$$

přičemž $\operatorname{div} \vec{\Phi} = -\operatorname{div} \operatorname{grad}(Dn) = -\nabla^2(Dn)$, kde D je *koefficient difúze*. Potom

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \nabla^2(Dn) = 0$$

Za předpokladu, že D je konstantní v celém objemu ($D \neq f(x, y, z)$), hledáme řešení pomocí vlastních funkcí n_j operátoru $D\nabla^2 n$. Koncentrace je pak rovna

$$n(\vec{r}, t) = \sum_j a_j(t) n_j(\vec{r})$$

Vlastní funkce musí splňovat rovnici

$$\nabla^2 n_j + \frac{1}{D\tau_j} n_j = 0$$

Dosazením do původní rovnice pak získáme řešení ve tvaru superpozice tzv. *difúzních vidů*, každému z nichž odpovídá určitá relaxační doba

$$n(\vec{r}, t) = \sum_j n_j(\vec{r}) \exp\left(-\frac{t}{\tau_j}\right)$$

Omezíme-li se na základní difúzní vid, tj. na ten, který dohasíná nejpomaleji, máme

$$n(\vec{r}, t) = n_0(\vec{r}) \exp\left(-\frac{D}{\Lambda^2} t\right)$$

kde $\Lambda^2 = \tau_0 D$ je *difúzní délka*. Je-li dále výbojka válcového tvaru, s délkou mnohokrát větší než poloměrem, problém je možno zredukovat na jednodimenzionální případ

$$n(x, t) = n_0(x) \exp\left(-\frac{D}{\Lambda^2} t\right)$$

V tom případě je radiální profil koncentrace

$$n_0(x) = \text{konst} \cdot \cos \frac{x}{\Lambda}$$

a difúzní délka je přímo úměrná poloměru výbojky

$$\Lambda \approx \frac{r_0}{2.405}$$

kde numerický faktor 2.405 je 1. kořen Besselovy funkce 1. druhu J_0 .

Objemová rekombinace

Počet rekombinujících částic za jednotku času v jednotkovém objemu je úměrný součinu počtů kladných a záporných částic

$$n_r = \alpha \cdot n^+ \cdot n^-$$

Konstanta úměrnosti α se nazývá *koeficient rekombinace*. V neutrálním plazmatu ($n^+ = n^-$) je potom časová změna koncentrace

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2$$

Určení převládajícího procesu

Porovnáme-li úbytky částic, způsobené difúzí a rekombinací, můžeme zjistit, který proces převládá

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{\text{rek}} = \frac{-\alpha n^2}{-\frac{D}{\Lambda^2} n} = \frac{\alpha \Lambda^2}{D} n$$

Pokud je $\frac{\alpha \Lambda^2}{D} n > 1$, převládá rekombinace, pokud naopak $\frac{\alpha \Lambda^2}{D} n < 1$, dominujícím procesem je difúze. Dále z výše uvedeného vztahu vyplývá, že rekombinační ztráty se projevují více při vysokém tlaku, difúzní při nízkém. Rozhodnout, který proces převládá, můžeme též určit ze závislosti koncentrace elektronů na čase $n = f(t)$.

Difúzní ztráty jsou charakterizovány časovou závislostí

$$n(t) = n_0 \exp\left(-\frac{D}{\Lambda^2} t\right)$$

tedy závislost

$$\ln n = f(t)$$

je přímková; ze směrnice pak lze určit koeficient difúze D .

Časová závislost koncentrace nabitých částic v případě *rekombinace* se řídí vztahem

$$\frac{1}{n(t)} = \frac{1}{n_0} + \alpha t$$

tedy závislost

$$\frac{1}{n} = f(t)$$

je přímková; ze směrnice určíme koeficient rekombinace α .

Rezonátorová metoda stanovení koncentrace elektronů

Tato metoda byla poprvé popsána SLATEREM r.1946 a spočívá v měření komplexní vysokofrekvenční vodivosti plazmatu. Zaplnění rezonátoru plazmatem způsobí změnu rezonanční frekvence ω a zároveň změnu kvality rezonátoru Q . Výpočet těchto změn v závislosti na zaplnění rezonátoru plazmatem byl proveden *poruchovou metodou*, která nám dá tento výsledek:

$$\Delta \left(\frac{1}{Q} \right) - 2i \frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{1}{\epsilon_0 \omega} \frac{\int_V \sigma E^2 dV}{\int_V E^2 dV}$$

kde V je celkový objem rezonátoru, V' objem rezonátoru zaplněný plazmatem, σ vodivost plazmatu a E amplituda v elektrického pole. Elektrická vodivost je obecně komplexní veličina

$$\sigma = \frac{ne^2}{m} \left(\frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2} - i \frac{\omega}{\omega^2 + \nu^2} \right)$$

K určení koncentrace elektronů n použijeme změnu rezonanční frekvence $\Delta\omega$. Za předpokladu, že srážková frekvence je nižší než kruhová frekvence budícího pole, je imaginární část vodivosti

$$\nu < \omega \Rightarrow \nu^2 \ll \omega^2 \Rightarrow \sigma_i = -\frac{ne^2}{m} \frac{1}{\omega}$$

Změna rezonanční frekvence (s plazmatem a bez plazmatu) je pak

$$\frac{2\Delta\omega}{\omega} = \frac{e^2}{\varepsilon_0 m \omega^2} \frac{\int_{V'} n(\vec{r}) E^2(\vec{r}) dV}{\int_V E^2(\vec{r}) dV}$$

Válcový rezonátor pracuje obvykle s videm TM_{010} :

$$E_r = 0$$

$$E_\varphi = 0$$

$$E_z(r) = E_0 \cdot J_0\left(2.405 \frac{r}{R}\right)$$

kde E_0 je amplituda v elektrického pole v ose rezonátoru o poloměru R a faktor 2.405 je 1. kořen Besselovy funkce 1. druhu J_0 .

Protože výbojka je pouze v oblasti blízko středu rezonátoru, můžeme $E(r, \varphi, z)$ nahradit konstantní hodnotou $E = 0.8 \cdot E_0$, kde 0.8 je vhodně zvolený numerický faktor. Vytkneme-li nyní E_0 v čitateli před integrál, dostáváme

$$\frac{2\Delta\omega}{\omega} = \frac{e^2}{\varepsilon_0 m \omega^2} \frac{(0.8)^2 E_0^2 \int_{V'} n(r, z, \varphi) dV}{E_0^2 \int_V J_0^2\left(2.405 \frac{r}{R}\right) dV}$$

Integrál v čitateli lze vyjádřit jako

$$\int_{V'} n(r, z, \varphi) dV = \bar{n} V'$$

kde \bar{n} je střední hodnota koncentrace elektronů v prostoru výbojky V' . Provedme nyní integraci jmenovatele

$$\int_V J_0^2\left(2.405 \frac{r}{R}\right) dV = \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^R J_0^2\left(2.405 \frac{r}{R}\right) r dr dz d\varphi = 2\pi h \cdot I(R)$$

kde h je délka výbojky a

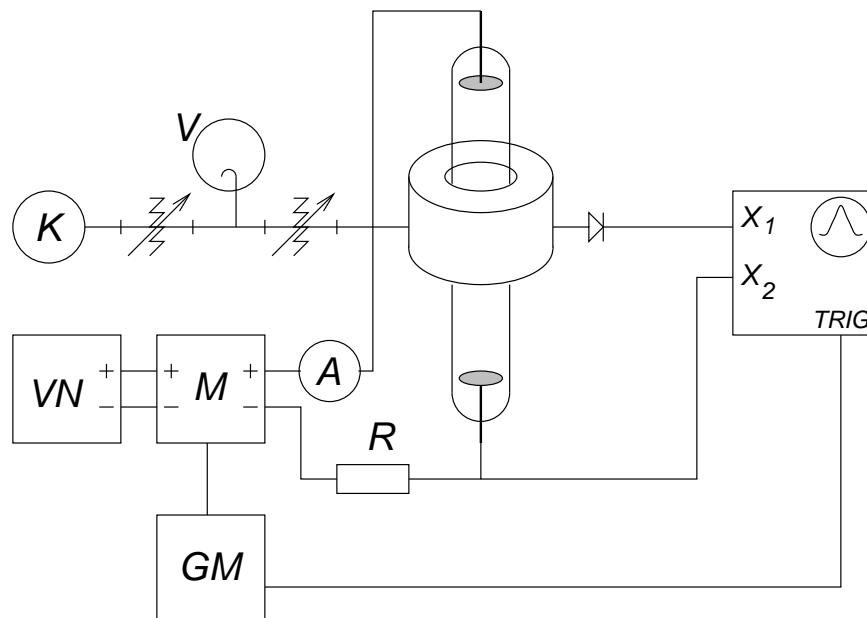
$$I(R) = \int_0^R \left[J_0\left(2.405 \frac{r}{R}\right) \right]^2 r dr = \frac{R^2}{2} \left\{ \underbrace{[J_0(2.405)]^2}_0 + \underbrace{[J_1(2.405)]^2}_{0.271} \right\} = \frac{R^2}{2} \cdot 0.271$$

Potom pro změnu rezonanční frekvence platí

$$\frac{2\Delta\omega(t)}{\omega} = \frac{0.64}{0.271} \frac{e^2}{\varepsilon_0 m \omega^2} \frac{V' \bar{n}(t)}{V}$$

Z tohoto vztahu pak můžeme určit střední koncentraci elektronů n ve výbojové trubici o průměru R' v závislosti na čase t

$$\bar{n}(t) = \frac{0.271}{0.64} \frac{V}{V'} \frac{2\Delta\omega(t)}{\omega} \frac{\varepsilon_0 m \omega^2}{e^2} = \frac{0.271}{0.64} \frac{R^2}{R'^2} \Delta f(t) \frac{8\pi^2 \varepsilon_0 m f}{e^2}$$



Popis aparatury

Vysokofrekvenční energie ze zdroje K s laditelnou frekvencí postupuje přes útlumový člen a přesný vlnoměr V do rezonátoru o poloměru $R = 40$ mm, jehož osou prochází výbojka o poloměru $R' = 9$ mm. Prošlý signál je usměrněn diodou a veden na vstup osciloskopu.

Vysoké napětí ze zdroje VN je klíčováno elektronickým pentodovým spínačem M a přes katodový odpor R vedeno na výbojku. Pentoda je řízena generátorem pravoúhlých pulsů GM , odkud je též veden synchronizační signál do osciloskopu. Proud výbojkou je měřen ampérmetrem. Napětí na výbojce je možno sledovat druhým kanálem osciloskopu.

Výbojka je čerpána rotační a difúzní vývěvou, tlak je měřen Piraniho vakuometrem. Tlak pracovní náplně výbojky (helium) je možné měnit pomocí dávkovače, vytvořeného ze dvou ventilů s malým rezervoárem mezi nimi.

Způsob měření

Nechť prázdný rezonátor má rezonanční frekvenci f_0 . Po zapálení výboje se tato zvýší na hodnotu f_1 . Vypneme-li výboj, plazma se začne rozpadat a rezonanční frekvence postupně klesá až na f_0 . Tento cyklus se neustále opakuje, proto ho můžeme zachytit osciloskopem. Ten je synchronizován tak, abychom mohli pozorovat dohasínání plazmatu.

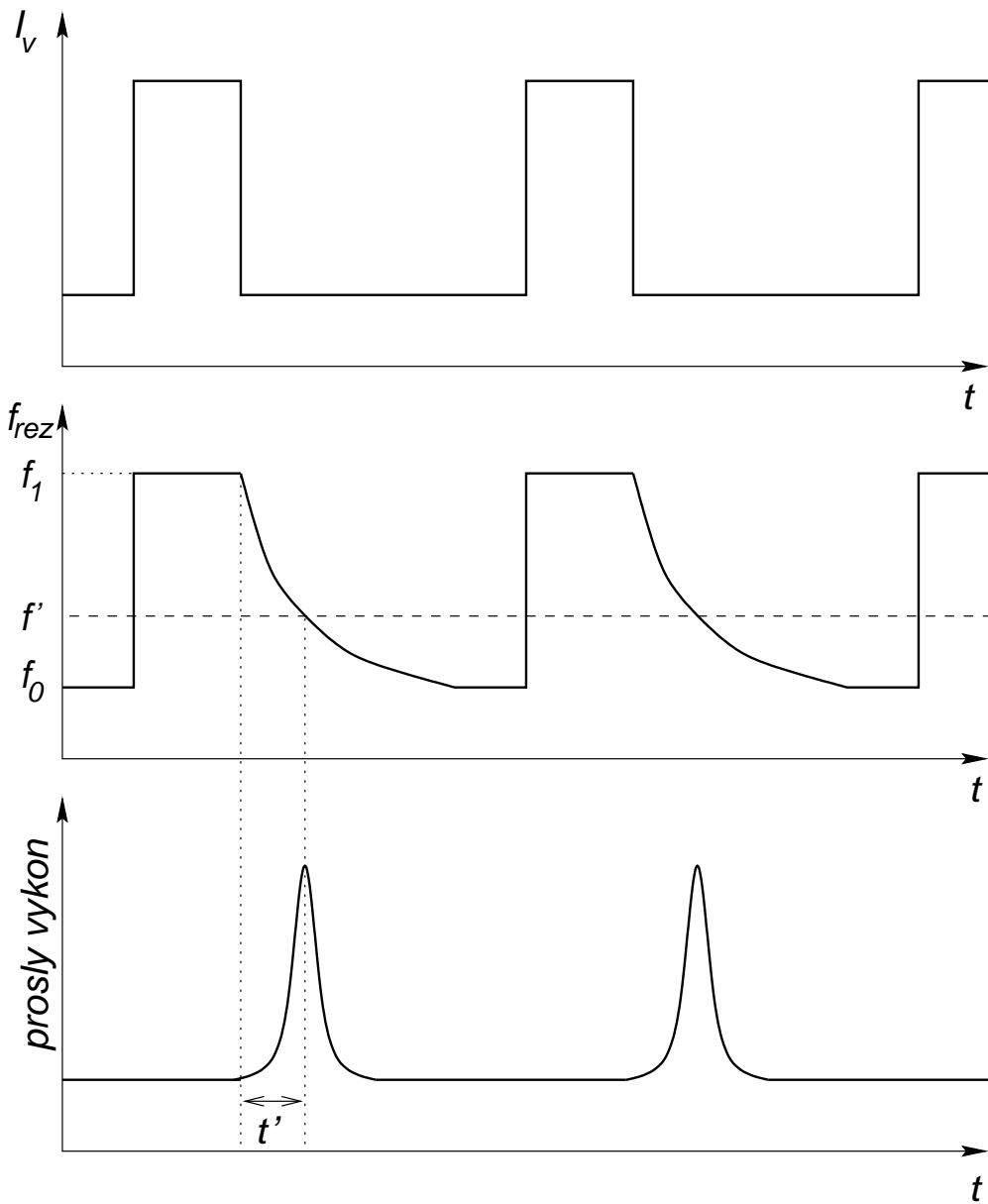
Rezonanční frekvence klesá s časem od vypnutí výboje. Pro pevně nastavenou frekvenci f' vř zdroje pak v určitém čase t' dojde k rezonanci, která se projeví zvýšeným přenosem vř energie rezonátorem a tedy vzrůstem procházejícího signálu, což můžeme detekovat na osciloskopu.

Frekvenci f' měníme v intervalu $(f_0; f_1)$. Z oscilogramu určíme t' a z rozdílu $\Delta f = f' - f_0$ vypočteme koncentraci elektronů $n_e(t)$. Vyneseme tyto závislosti:

$$\frac{1}{n} = f(t)$$

$$\ln n = f(t)$$

a určíme veličiny α , D a rozhodneme, který z procesů (rekombinace/difúze) převládá. Měření provedeme pro tři různé hodnoty tlaku (200 Pa, 1000 Pa a 5000 Pa).



Závislost výbojového proudu, rezonanční frekvence a signálu prošlého rezonátorem na čase.