

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity

PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

Studium rozpadu plazmatu mikrovlnnou metodou

Zpracovali: Radek Horňák, Lukáš Vrána

Naměřeno: 15. 3. 2022

1 Teorie

1.1 Difuze a rekombinace v plazmatu

Důležitou charakteristikou plazmatu jakožto ionizovaného plynu je koncentrace elektronů a iontů. Pokud přestaneme dodávat energii, plazma se začne rozpadat, což se projeví postupným poklesem koncentrace nabitých částic. Tento pokles je způsoben buď difúzí a následnou rekombinací na stěnách nebo objemovou rekombinací.

Řešením rovnice kontinuity pro koncentraci elektronů

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{\Phi} = 0 \quad (1)$$

za předpokladu, že máme výbojku válcového tvaru s délkou větší než poloměrem, dostáváme koncentraci elektronů v jedné dimenzi jako

$$n(x, t) = n_0(x) e^{\left(-\frac{Dt}{\Lambda^2}\right)} \quad (2)$$

kde n_0 je koncentrace elektronů v počátku $x = 0$, D je difúzní koeficient, t je čas a Λ je difúzní délka.

Radiální profil koncentrace je v tomto případě

$$n_0(x) = \text{konst. } J_0\left(\frac{x}{\Lambda}\right) \quad (3)$$

kde J_0 je Besselova funkce prvního druhu. Difúzní délku lze vyjádřit jako

$$\Lambda \approx \frac{r_0}{2,405} \quad (4)$$

kde r_0 je poloměr výbojky a 2,405 je první kořen funkce J_0 .

Objemovou rekombinaci můžeme napsat jako časovou změnu koncentrace, tedy

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha n^2 \quad (5)$$

kde α je koeficient rekombinace. Obecně platí, že rekombinační ztráty se více projevují při vysokém tlaku, difúzní ztráty naopak při nízkém tlaku. Difúzní ztráty jsou charakterizovány časovou závislostí

$$n(t) = n_0 e^{\left(-\frac{Dt}{\Lambda^2}\right)} \quad (6)$$

a tedy funkce $\ln n = f(t)$ je lineární, ze směrnice přímky lze určit D . V případě rekombinace platí

$$\frac{1}{n(t)} = \frac{1}{n_0} + \alpha t \quad (7)$$

a závislost $1/n = f(t)$ je lineární, ze směrnice určíme α . Pokud tímto způsobem určíme jeden z koeficientů, tedy D nebo α , děláme to za předpokladu zanedbání druhého procesu. Nabízí se tedy vyjádřit $n(t)$ se zahrnutím obou koeficientů pomocí zpřesněné rovnice

$$n(t) = \frac{1}{c e^{\frac{tD}{\Lambda^2}} - \frac{\alpha\Lambda^2}{D}} \quad (8)$$

1.2 Rezonátorová metoda stanovení koncentrace elektronů

Pokud v rezonátoru zapálíme plazma, změní se jeho rezonanční frekvence ω i kvalita rezonátoru Q . Pro střední koncentraci elektronů n ve výbojce o průměru R' platí závislost na čase

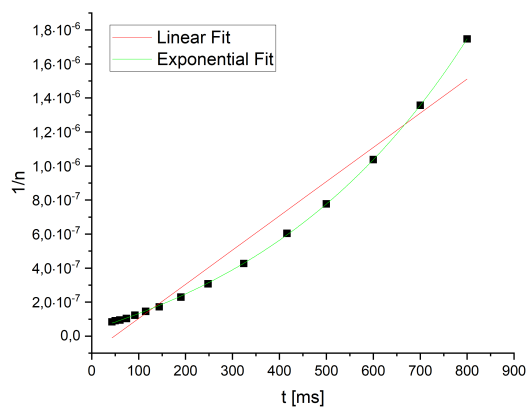
$$\vec{n}(t) = \frac{0,271R^2\Delta f(t)8\pi^2\epsilon_0mf_0}{0,64R'^2e^2} \quad (9)$$

kde R je poloměr rezonátoru, $\Delta f(t)$ je rozdíl frekvence vysokofrekvenčního zdroje f' a rezonanční frekvence prázdného rezonátoru f_0 , ϵ_0 je permitivita vakua, m je hmotnost elektronu, R' je poloměr výbojky a e je elementární náboj.

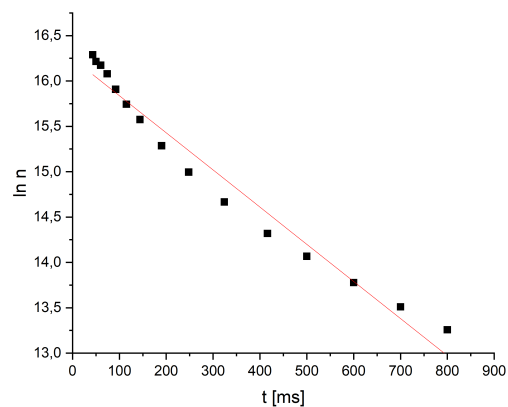
2 Měření a výsledky

Měřicí aparatura obsahuje vysokofrekvenční laditelný zdroj, který dodává energii do rezonátoru o poloměru $R = 40$ mm, jehož osou prochází výbojka o poloměru $R' = 9$ mm. Prošlý signál je na vstupu do osciloskopu usměrněný diodou. Proud měříme ampérmetrem, napětí osciloskopem. Výbojka je čerpána rotační olejovou a difuzní vývěvou, tlak měříme Piraniho manometrem. Ve výbojce máme helium jehož tlak lze měnit.

Rezonanční frekvence prázdného rezonátoru f_0 se po zapálení výboje zvýší na f_1 . Po vypnutí přívodu energie se plazma začne rozpadat a rezonanční frekvence opět klesá až na původní hodnotu f_0 . Tento periodický proces lze zachytit osciloskopem. Při měření měníme frekvenci zdroje f' a z oscilogramu určíme čas t' , za který dojde k rezonanci. Také si zaznamenáváme f_0 , abychom následně mohli vypočítat koncentraci elektronů mimo jiné z Δf . Následně můžeme graficky vynést závislosti $1/n = f(t)$ a $\ln n = f(t)$, určit z nich α , D a rozhodnout, zda je převládajícím procesem difúze nebo rekombinace. α a D včetně n_0 také určíme proložením funkcí podle rovnice 8 a výsledky porovnáme.

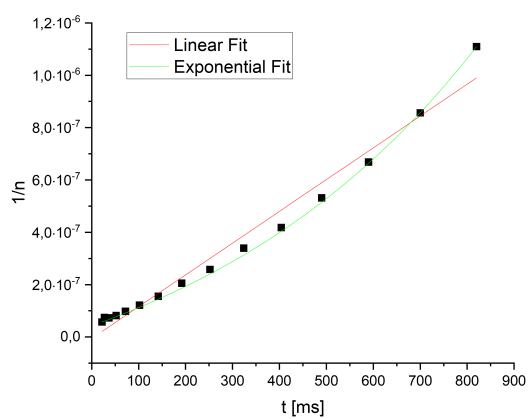


(a) $f(t) = 1/n$

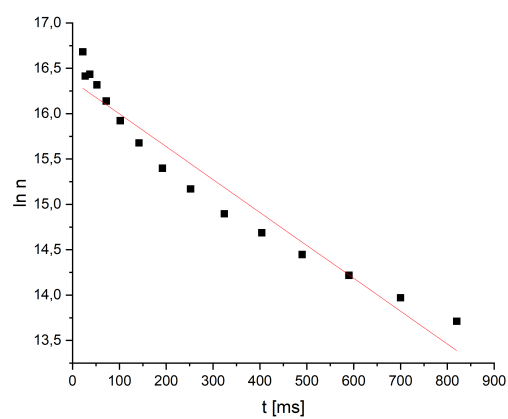


(b) $f(t) = \ln n$

Obrázek 1: Časová závislost koncentrace elektronů pro tlak 5 Pa.



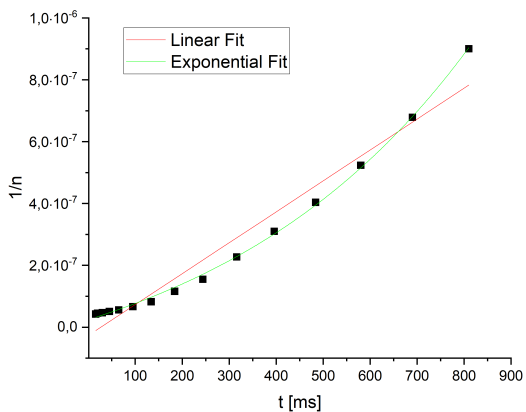
(a) $f(t) = 1/n$



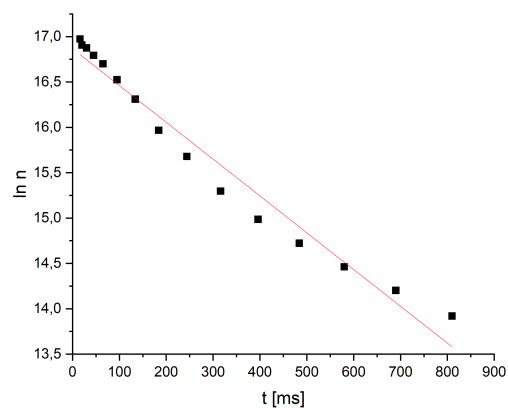
(b) $f(t) = \ln n$

Obrázek 2: Časová závislost koncentrace elektronů pro tlak 10 Pa.

3 Závěr

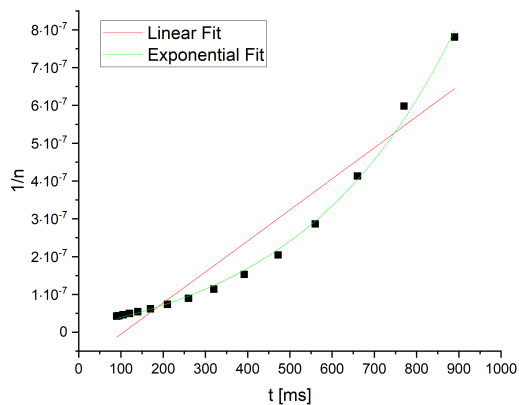


(a) $f(t) = 1/n$

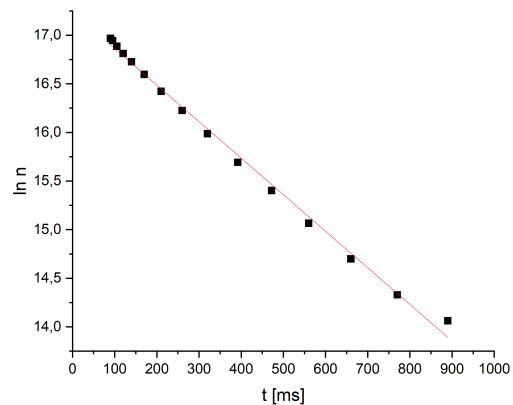


(b) $f(t) = \ln n$

Obrázek 3: Časová závislost koncentrace elektronů pro tlak 20 Pa.

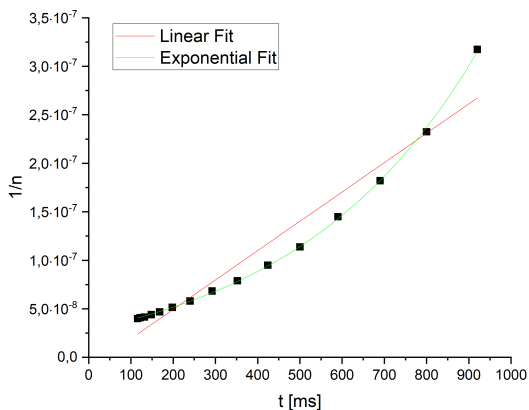


(a) $f(t) = 1/n$

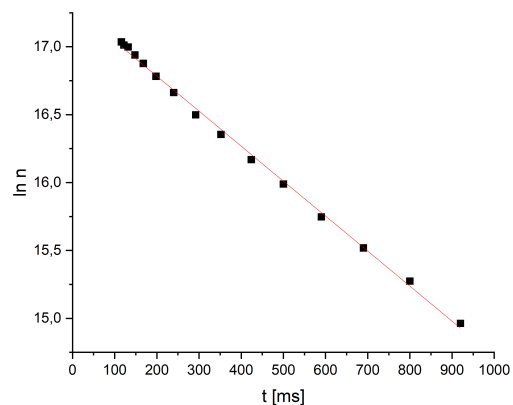


(b) $f(t) = \ln n$

Obrázek 4: Časová závislost koncentrace elektronů pro tlak 50 Pa.

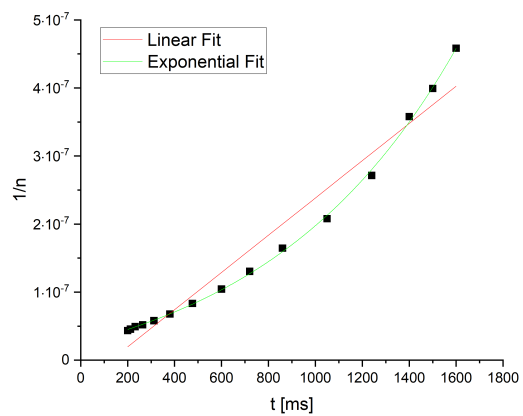


(a) $f(t) = 1/n$

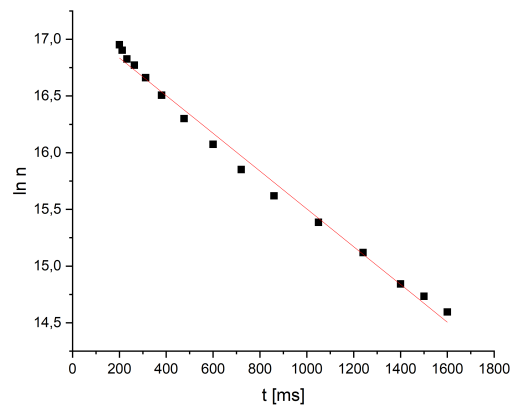


(b) $f(t) = \ln n$

Obrázek 5: Časová závislost koncentrace elektronů pro tlak 100 Pa.

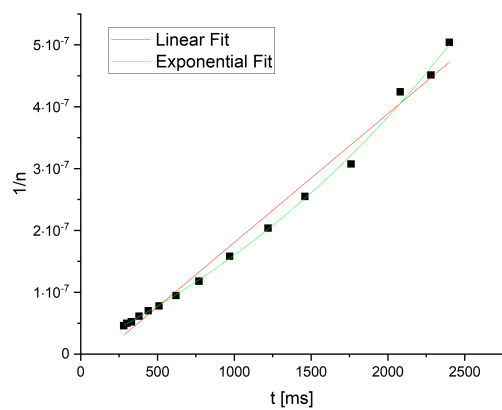


(a) $f(t) = 1/n$

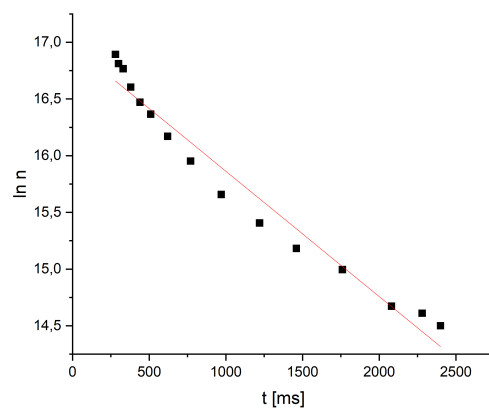


(b) $f(t) = \ln n$

Obrázek 6: Časová závislost koncentrace elektronů pro tlak 200 Pa.



(a) $f(t) = 1/n$



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

Obrázek 7: Časová závislost koncentrace elektronů pro tlak 450 Pa.