

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  $\Lambda$  je difuzní 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. Difuzní 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  $\alpha$  je koeficient rekombinace. Obecně platí, že rekombinační ztráty se více projevují při vysokém tlaku. Difuzní ztráty jsou naopak dominantní při nízkém tlaku a 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  $\alpha$ . Pokud tímto způsobem určíme jeden z koeficientů, tedy  $D$  nebo  $\alpha$ , 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  $\omega$  i kvalita rezonátoru  $Q$ . Pro střední koncentraci elektronů  $n$  ve výbojce o průměru  $R'$  platí závislost na čase

$$\vec{n}(t) = \frac{0,271 R^2 \Delta f(t) 8\pi^2 \epsilon_0 m f_0}{0,64 R'^2 e^2} \quad (9)$$

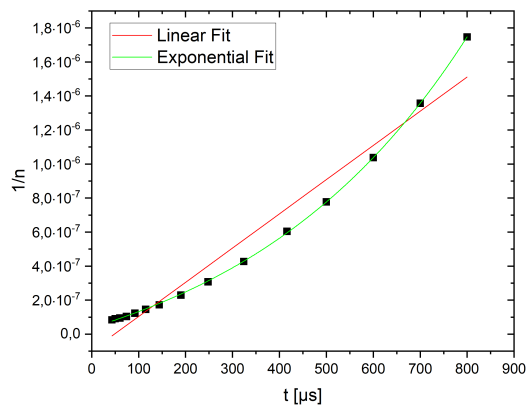
kde  $R$  je poloměr rezonátoru,  $\Delta f(t)$  je rozdíl frekvencí zdroje  $f'$  a rezonanční frekvence prázdného rezonátoru  $f_0$ ,  $\epsilon_0$  je permitivita vakua,  $m$  je hmotnost elektronu,  $R'$  je poloměr výbojky a  $e$  je elementární náboj.

## 2 Měření a výsledky

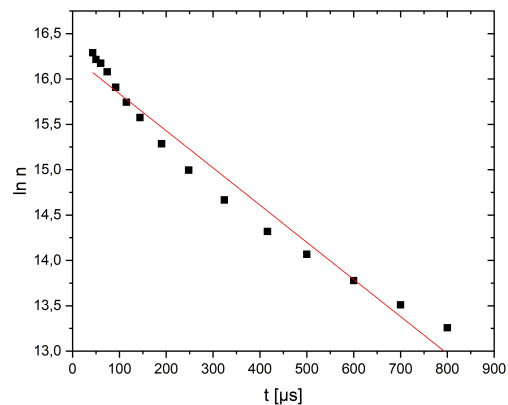
Měřicí aparatura obsahuje vysokofrekvenční laditelný zdroj, který dodává energii do rezonátoru o poloměru  $R = 40$  mm, jehož osou prochází výbojka o poloměru  $R' = 9$  mm. Prošlý signál je na vstupu do osciloskopu usměrněný diodou. Proud měříme ampérmetrem, napětí osciloskopem. Výbojka je čerpána 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 určujeme čas  $t'$ , za který dojde k rezonanci. Také si zaznamenáváme  $f_0$ , abychom následně mohli vypočítat koncentraci elektronů ze vztahu (9). Následně můžeme graficky vynést závislosti  $1/n = f(t)$  a  $\ln n = f(t)$ , určit z nich  $\alpha$ ,  $D$  a rozhodnout, zda je převládajícím procesem difúze nebo rekombinace.  $\alpha$  a  $D$  včetně  $n_0$  také určíme proložením funkcí podle rovnice (8) a výsledky porovnáme.

Závislosti  $1/n = f(t)$  a  $\ln n = f(t)$  včetně proložení podle exponenciální rovnice (8) jsou vyneseny v grafech na obrázcích 1–7. Koeficienty  $\alpha$  a  $D$  určené z proložených lineárních a exponenciálních funkcí jsou uvedeny v tab. 1. Vidíme, že exponenciální fit podle rovnice 8 je nejpřesnější, při našich podmínkách měření tedy probíhala rekombinace i difuze zároveň. Výsledné koeficienty se z lineárních fitů oproti exponenciálnímu fitu liší v některých případech i více než dvojnásobně. Pro tlaky v rozmezí 50–200 Pa jsou závislosti  $\ln n = f(t)$  téměř lineární, převládá zde tedy difuze nad rekombinací. Pro vyšší tlak 450 Pa je lineárnější závislost  $1/n = f(t)$ , dominantní je rekombinace v objemu. Toto pozorování je v souladu s teorií. Pro tlaky 5–20 Pa není ani jedna ze závislostí lineární, nelze tak určit dominantní proces.

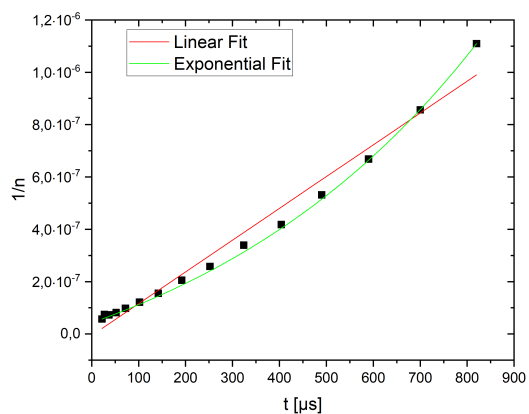


(a)  $f(t) = 1/n$

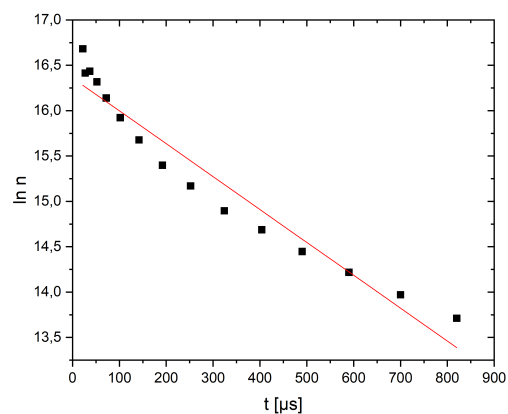


(b)  $f(t) = \ln n$

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

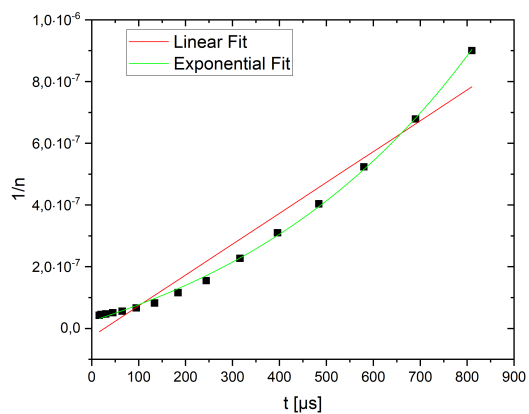


(a)  $f(t) = 1/n$

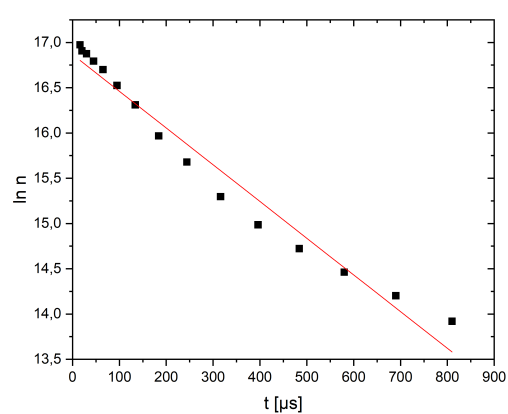


(b)  $f(t) = \ln n$

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

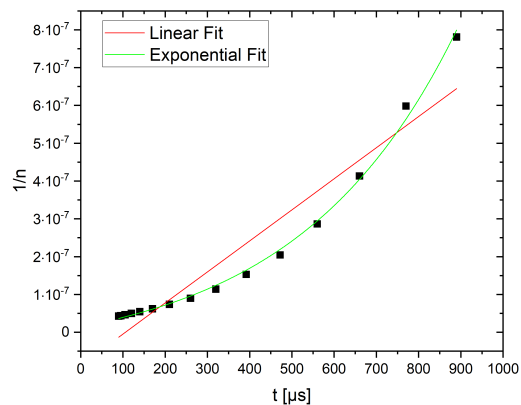


(a)  $f(t) = 1/n$

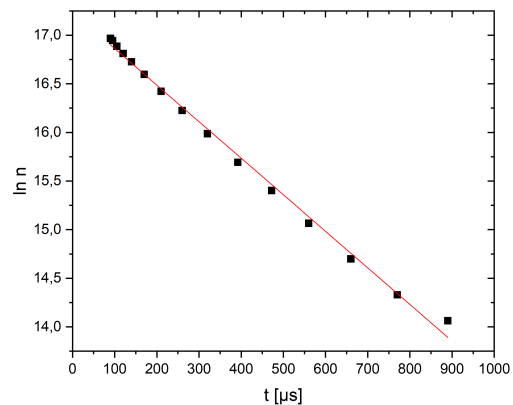


(b)  $f(t) = \ln n$

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

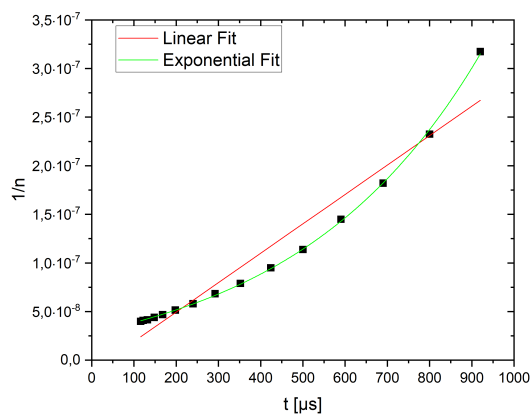


(a)  $f(t) = 1/n$

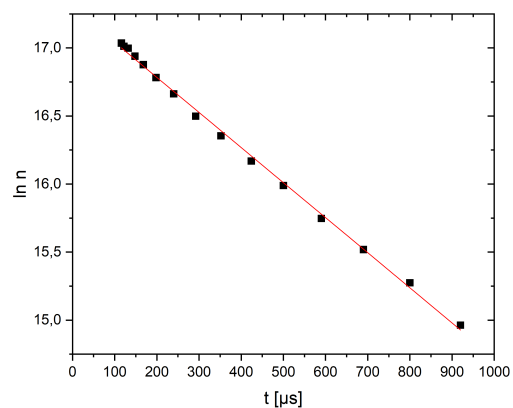


(b)  $f(t) = \ln n$

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

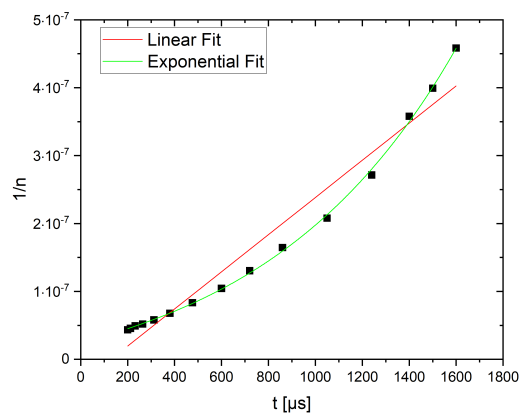


(a)  $f(t) = 1/n$

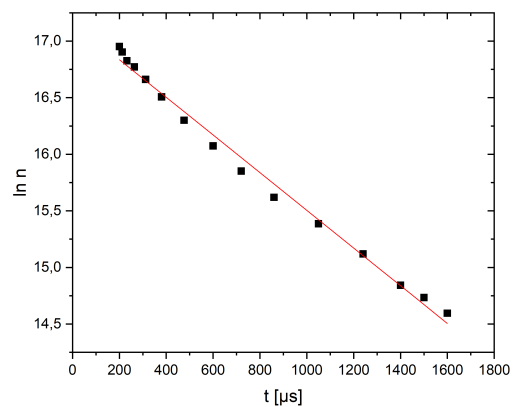


(b)  $f(t) = \ln n$

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

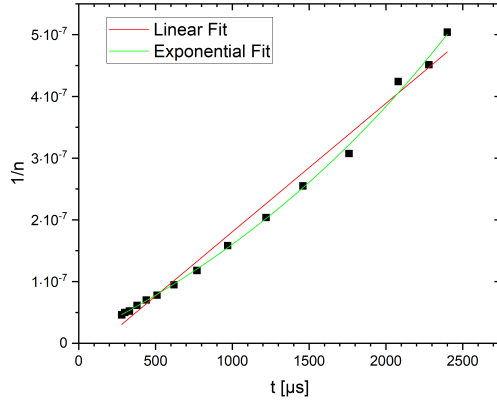


(a)  $f(t) = 1/n$

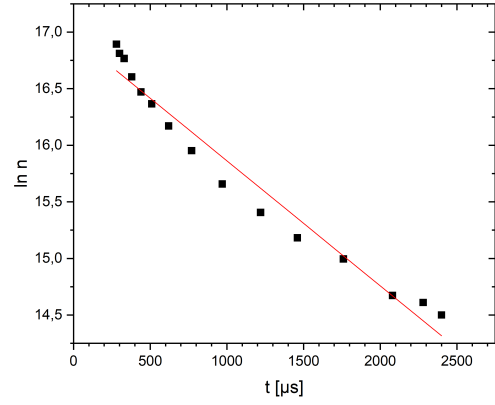


(b)  $f(t) = \ln n$

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.

Tabulka 1: Hodnoty koeficientu rekombinace  $\alpha$  a difuzního koeficientu  $D$  určené ze závislostí  $1/n = f(t)$ ,  $\ln n = f(t)$  a kombinované dle rovnice (8).

Tlak	$1/n = f(t)$	$\ln n = f(t)$	Obě rekombinace	
[Pa]	$\alpha [\text{s}^{-1}] \cdot 10^{-3}$	$D [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \cdot 10^{-3}$	$\alpha [\text{s}^{-1}] \cdot 10^{-3}$	$D [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \cdot 10^{-3}$
5	$2.01 \pm 0.11$	$57.3 \pm 2.8$	$0.7734 \pm 0.0004$	$28.4 \pm 0.4$
10	$1.21 \pm 0.05$	$50.7 \pm 3.3$	$0.576 \pm 0.006$	$21.8 \pm 1.5$
20	$1.00 \pm 0.06$	$56.9 \pm 2.7$	$0.436 \pm 0.003$	$25.2 \pm 1.3$
50	$0.82 \pm 0.07$	$52.7 \pm 1.0$	$0.180 \pm 0.003$	$37.1 \pm 2.2$
100	$0.30 \pm 0.02$	$36.1 \pm 0.5$	$0.0292 \pm 0.0002$	$31.6 \pm 0.8$
200	$0.27 \pm 0.02$	$23.2 \pm 0.6$	$0.0590 \pm 0.0004$	$16.8 \pm 0.7$
450	$0.21 \pm 0.01$	$15.5 \pm 0.8$	$0.118 \pm 0.003$	$5.6 \pm 0.7$

### 3 Závěr

V této úloze jsme se zabývali rozpadem plazmatu a popsali jsme procesy, jakým k němu dochází. Naším úkolem bylo určit koncentraci elektronů v závislosti na čase, za který dojde k rezonanci. Z těchto závislostí, které jsme naměřili pro tlaky v rozmezí 5–450 Pa, jsme fitováním třemi různými funkcemi určili koeficienty rekombinace a difuzní koeficienty. Naše výsledky se pro oblast 50–450 Pa shodují s teorií. Při nízkém tlaku do 200 Pa je dominantním procesem difuze, při 450 Pa je to naopak rekombinace. Pro tlaky 5–20 Pa jsme z našich dat převládající proces určit nedokázali.