

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity

# PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

Mikrovlnná interferometrie plazmatu

**Zpracovali:** Radek Horňák, Lukáš Vrána

**Naměřeno:** 5. 4. 2022

---

## 1 Teorie

Plazma lze obecně kvalitativně považovat za vodič, dielektrikum či magnetickou kapalinu. Výběr modelu je závislý na konkrétní situaci. V případě interakce elektromagnetického záření s plazmatem se v oblasti nízkých frekvencí plazma popisuje jako vodič pomocí nízkofrekvenční vodivosti, při vysokých frekvencích je vhodná aplikace dielektrického modelu včetně definice vysokofrekvenční permitivity. Hranicí mezi nízkými a vysokými frekvencemi je plazmová frekvence  $\omega_{\text{pl}}$ , od které se může vlna plazmatem šířit. Ta souvisí s hustotou plazmatu pomocí vztahu

$$\omega_{\text{pl}} = \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \quad (1)$$

kde  $n_e$  je hustota volných elektronů,  $e$  elementární náboj,  $m_e$  hmotnost elektronu a  $\epsilon_0$  permitivita vakua.

Pro dielektrický model nemagnetického plazmatu je permitivita komplexní skalár ve tvaru  $\epsilon_r = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ . V případě, že pro popis rozdělení rychlosti elektronů zvolíme Maxwellovo rozdělení, je relativní permitivita popsána vztahem

$$\epsilon_r = 1 - \frac{n_e e^2 (\omega - i\nu_m)}{m_e \epsilon_0 \omega (\omega^2 + \nu_m^2)} \quad (2)$$

kde  $\nu_m$  je srážková frekvence pro přenos hybnosti elektron–neutrál. Na rozdíl od běžných dielektrik je reálná část permitivity plazmatu menší než jedna. Místo relativní permitivity můžeme obdobně popisovat plazma pomocí komplexního indexu lomu  $N = n + i\kappa$ , přičemž mezi ním a relativní permitivitou je vztah  $N^2 = \epsilon_r$ . Pro jeho složky platí

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}} \quad (3)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{-\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}} \quad (4)$$

Reálná část indexu lomu je přímo úměrná fázové rychlosti vlny a tedy i fázovému posuvu  $\Delta\phi$ . Platí vztah

$$\Delta\phi = k_0(1 - n)\Delta z \quad (5)$$

kde  $k_0$  je vlnové číslo a  $\Delta z$  kus dráhy.

## 1.1 Stanovení hustoty elektronů

Pro stanovení hustoty elektronů aproximujeme vztah pro relativní permitivitu (2) tak, že zanedbáme imaginární složku a vypustíme  $\nu_m^2$ ). Dostáváme

$$\epsilon_r = 1 - \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0 \omega^2} \quad (6)$$

Po dosazení do (5) a úpravách můžeme vyjádřit koncentraci elektronů v závislosti na fázovém posunu jako

$$n_e = \frac{1 - \left(1 - \frac{\Delta\phi}{k_0 \Delta z}\right)^2 m_e \epsilon_0 \omega^2}{e^2} \quad (7)$$

## 1.2 Stanovení srážkové frekvence

Pomocí Taylorova rozvoje je možné dojít k tvaru imaginární části indexu lomu

$$\kappa = \frac{|\epsilon_2|}{2\sqrt{2}|\epsilon_1|} \quad (8)$$

Zkombinováním tohoto vztahu s (2), (3), (4) a zanedbáním kvadratických členů můžeme vyjádřit srážkovou frekvenci jako

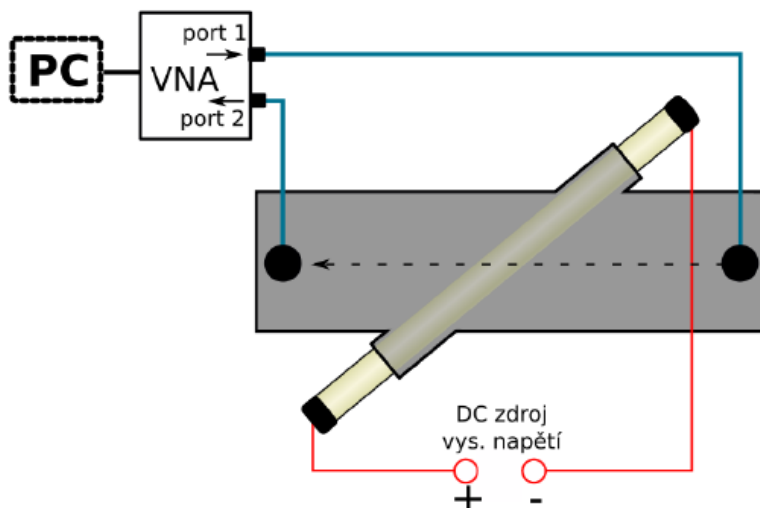
$$\nu_m = \frac{c \ln \frac{P_0}{P} 2\sqrt{2}|\epsilon_1|}{2\omega \Delta z \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0 \omega^3}} \quad (9)$$

kde  $P_0$  je dodávaný výkon a  $P$  je součet prošlého a odraženého výkonu. Výpočet srážkové frekvence tedy předpokládá znalost koncentrace elektronů.

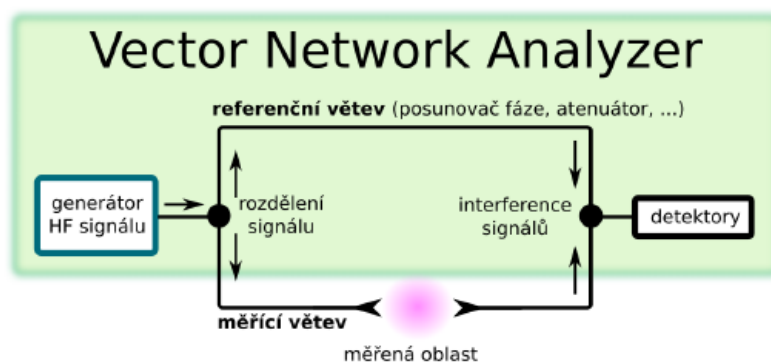
## 2 Měření a výsledky

Měřicí aparatura se skládá ze zářivky procházející vlnovodem. Uvnitř ní je zapálený doutnavý výboj v argonu a parách rtuti za sníženého tlaku, typicky kolem 400 Pa. Schéma aparatury je na obr. 1. Důležitým prvkem v zapojení je Vector Network Analyzer (VNA), který zastává funkci vysokofrekvenčního zdroje i detektoru. V klasickém interferometrickém experimentu je signál ze zdroje rozdělený do referenční a měřicí větve, které jsou nakonec svedeny dohromady. Výsledný detekovaný signál je tedy interferencí signálů z obou větví. Abychom kromě změny fáze také detekovali změnu amplitudy signálu, je potřeba použít metodu kvadrurní detekce se dvěma detektory. VNA, jehož schéma je vidět na obr. 2, má uvnitř integrovanou referenční větev včetně detektorů, nám tedy stačí přes dva porty připojit měřicí větev. Prostřednictvím VNA měříme  $S$  parametry rozptylové matice.

Před měřením je potřeba VNA zkalibrovat. To se klasicky provádí pomocí definovaných zátěží – short, open a match. Měření probíhá následovně: Na vysokonapětovém zdroji měníme proud mezi hodnotami 0,2–3 mA a zaznamenáváme fázi a prošlý výkon parametru  $S_{21}$ . Odražený výkon zanedbáváme. První sadu dat měříme pro oblast frekvencí 1,5–3 GHz. Na VNA máme zapnuté x10 průměrování, čímž potlačíme šum. Každé dvě měření s určitými hodnotami proudu na zářivce vystřídáme měřením s nulovým proudem, tedy vypnutou zářivkou. Při zpracování dat poté vztahujeme jednotlivá měření k nejbližšímu s nulovým proudem. Tímto způsobem tedy zkoumáme vliv výboje v zářivce umístěné ve vlnovodu na procházející signál vlnovodem.



Obrázek 1: Schéma měřící aparatury



Obrázek 2:

Druhou sadu dat jsme naměřili stejným způsobem pro menší oblast frekvencí 2,235–2,265 GHz.

Ve výpočtech vystupuje veličina  $\Delta z$ , kterou jsme obecně označili jako kus dráhy. V našem případě se jedná o tloušťku plazmatu, kterou je potřeba odhadnout. To provedeme pomocí geometrické úvahy ze znalosti příčného rozměru vlnovodu 86 mm, průměru zářivky 18 mm a úhlu mezi zářivkou a vlnovodem  $35^\circ$ . Za předpokladu, že zářivka má objem válce, který následně aproximujeme pravidelným čtyřbokým hranolem, tloušťka plazmatu podél nejdelšího rozměru vlnovodu je 24,6 mm.

### 3 Závěr