

## PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

Paschenův zákon, katodový spád potenciálu v doutnavém výboji

**Zpracovali:** Radek Horňák, Lukáš Vrána

**Naměřeno:** 15. 3. 2022

---

## 1 Teorie

### 1.1 Paschenův zákon

Z Townsendovy teorie lavin víme, že působením elektrického pole na zředěný plyn dochází k urychlování přítomných elektronů. Takto urychlené elektrony mohou ionizovat neutrální částice a vytvořit takzvanou Townsendovu lavinu. Počet elektronů vzniklých v důsledku Townsendovy laviny závisí exponenciálně na dráze  $d$

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (1)$$

kde  $n_0$  je počet elektronů v počátečním bodě  $d = 0$  a  $\alpha$  je první Townsendův nebo také ionizační koeficient. Elektrické pole můžeme charakterizovat napětím  $U$  přiloženým mezi dvě rovinné elektrody, dráha  $d$  je vzdálenost mezi elektrodami. Elektronovou lavinu doprovází vznik iontů, jejichž počet lze vyjádřit jako

$$n_i = n_0 [e^{\alpha d} - 1] \quad (2)$$

Ionty jsou polem urychlovány ke katodě, dopadají na ni a vyvolávají sekundární emisi elektronů. Tu popisuje Townsendův třetí koeficient neboli koeficient sekundární emise  $\gamma$ . Konkrétně udává průměrný počet elektronů emitovaných jedním iontem při jeho dopadu na katodu. Pomocí  $\gamma$  lze vyjádřit podmínku zapálení výboje jako

$$\gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (3)$$

tedy že v lavině musí být jedním primárním elektronem vytvořeno tolik iontů, které dopadem na katodu způsobí emisi jednoho nového elektronu. Ionizační koeficient  $\alpha$  závisí na intenzitě elektrického pole

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{Bp}{E}} \quad (4)$$

kde  $A = 1/\lambda_1$  a  $B = U/\lambda_1$  jsou konstanty závislé na druhu plynu,  $\lambda_1$  je střední volná dráha elektronů při jednotkovém tlaku. Dále lze (4) přepsat jako

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{Bpd}{U}} \quad (5)$$

Logaritmováním a úpravou (5) získáme

$$U = \frac{Bpd}{\ln A - \ln \frac{\alpha}{d}} \quad (6)$$

Dosazením  $\alpha d$  z (6) do (3), logaritmováním a dalšími úpravami dojdeme k tvaru

$$A p d e^{-\frac{B p d}{U_z}} = \ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right) \quad (7)$$

kde  $U_z$  je zápalné napětí výboje. Pro daný plyn a materiál katody položíme pravou stranu (7)

$$\ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right) = C \quad (8)$$

Úpravami dostáváme

$$U_z = \frac{B p d}{C' + \ln(p d)} \quad (9)$$

kde  $C' = \ln C - \ln A$ . Závislost  $U_z = f(p d)$  se nazývá Paschenův zákon. Má charakteristický tvar, včetně minima nazývaného Stoletowův bod.

## 1.2 Katodový spád potenciálu v doutnavém výboji

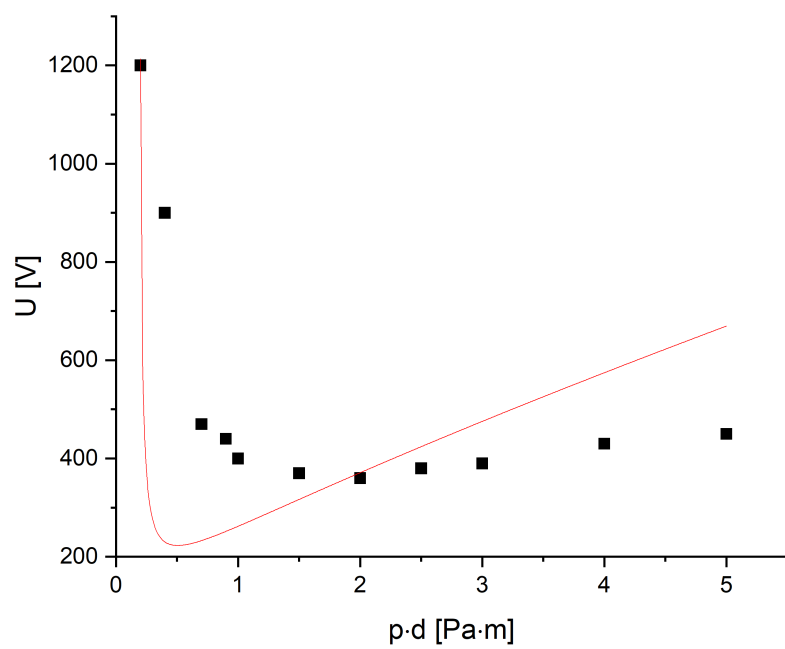
# 2 Měření a výsledky

## 2.1 Paschenův zákon

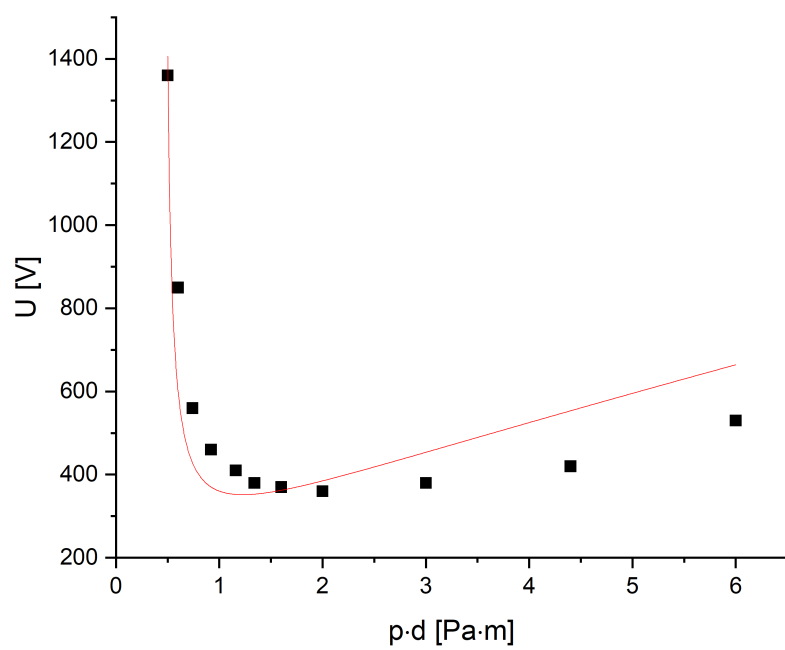
Pro měření použijeme výbojku s pohyblivými elektrodami. Tlak měříme Piraniho manometrem, zápalné napětí určujeme voltmetrem s vysokým vstupním odporem. Plyn ve výbojce je vzduch, kalibrační faktor k Piraniho manometru je tedy 1. První měření provedeme s konstantním tlakem  $p = 100 \text{ Pa}$ , přičemž budeme měnit vzdálenost elektrod od 2 mm do 50 mm. Na výbojce zvyšujeme napětí a odečítáme hodnotu napětí v okamžiku zapálení výboje. Mezi každým měřením vyčkáváme alespoň jednu minutu na rekombinaci náboje ve výbojce. Výsledný graf závislosti  $U_z = f(p d)$  je na obr. 1. Body jsou proloženy funkcí podle rovnice (9) a dostáváme  $B = 440,68 \pm 94,46$  a  $C' = 1,68 \pm 0,03$ . Výsledky měření se od ideální závislosti popsané rovnicí (9) docela odchyľují. Tato odchylka může být způsobena jak nepřesností odečítání zápalného napětí, tak nedostatečnou rekombinací nábojů mezi jednotlivými měřeními.

Druhé měření je za konstantní vzdálenosti elektrod  $d = 20 \text{ mm}$ , měníme tlak od 25 Pa do 300 Pa. Opět zapisujeme hodnotu napětí v okamžiku zapálení výboje. Graf závislosti  $U_z = f(p d)$  je na obr. 2. Body jsou proloženy funkcí podle rovnice (9) a dostáváme  $B = 286,26 \pm 27,22$  a  $C' = 0,79 \pm 0,01$ . Toto měření se oproti předchozímu více blíží ideální závislosti popsané rovnicí (9), z grafu vidíme až na malou odchylku typickou závislost napětí na součinu tlaku a vzdálenosti elektrod.

# 3 Závěr



Obrázek 1: Naměřená Paschenova křivka při konstantním tlaku.



Obrázek 2: Naměřená Paschenova křivka při konstantní vzdálenosti elektrod.