

# Paschenův zákon

## Obsah

<b>1</b>	<b>Paschenův zákon</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Měření</b>	<b>3</b>
2.1	Úkoly . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Katodový spád potenciálu v doutnavém výboji</b>	<b>5</b>
3.1	Úvod . . . . .	5
3.2	Doutnavý výboj . . . . .	6
3.3	Normální katodový spád potenciálu. . . . .	7
<b>4</b>	<b>Měření</b>	<b>7</b>
4.1	Úkoly . . . . .	8

# 1 Paschenův zákon

Při působení elektrického pole na zředěný plyn dochází k urychlování náhodných elektronů v plynu do takových energií, že při srážkách urychlených elektronů s molekulami plynu dochází k ionizaci elektronovým nárazem a počet elektronů exponenciálně vzrůstá v důsledku Townsendovy laviny v závislosti na dráze  $d$ , kterou elektrony uběhly

$$n = n_0 \exp(\alpha d) \quad (1)$$

Nechť elektrické pole je vytvářeno napětím  $V$  vloženým mezi dvě rovinné elektrody, umístěné ve zředěném plynu. Vzdálenost elektrod nechť je  $d$ . Při vzniku laviny vzniká i  $n_0[\exp(\alpha d) - 1]$  iontů. Tyto ionty se pohybují v elektrickém poli ke katodě a dopadají na ni. Při dopadu vyvolávají sekundární emisi elektronů z katody. Koeficient sekundární emise  $\gamma$  udává průměrný počet elektronů emitovaných jedním iontem. Do koeficientu  $\gamma$  se někdy zahrnuje i emise vyvolaná zářením souvisejícím se vznikem jednoho páru nosičů náboje.

Podmínka zapálení výboje je daná rovnicí

$$\gamma(\exp(\alpha d) - 1) = 1 \quad (2)$$

což znamená, že v lavine musí být jedním primárním elektronem vytvořeno tolik iontů, které dopadem na katodu způsobí emisi jednoho nového elektronu. Townsendův ionizační koeficient  $\alpha$  závisí na intenzitě el. pole vztahem

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{x/p}\right) \quad (3)$$

kde  $A = 1/\lambda_1$  a  $B = U_i/\lambda_1$  jsou konstanty závislé na druhu plynu,  $\lambda_1$  je stř. volná dráha elektronů při jednotkovém tlaku.

Použitím vztahů (2) a (3) snadno odvodíme pro zápalné napětí  $V_z = f(pd)$ .

Úpravou dostáváme

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{Bpd}{V}\right) \quad (4)$$

$$\ln \frac{\alpha}{p} = \ln A - \frac{Bpd}{V} \quad (5)$$

Odtud

$$V = \frac{Bpd}{\ln A - \ln \frac{\alpha}{p}} \quad (6)$$

Upravme dále podmínku zapálení výboje (2) do níž dosadíme

$$\alpha d = A p d \exp\left(-\frac{Bpd}{V}\right) \quad (7)$$

dostáváme

$$\gamma \left[ \exp\left(A p d \exp\left(-\frac{Bpd}{V_z}\right)\right) - 1 \right] = 1 \quad (8)$$

Po úpravě a logaritmování

$$\exp \left[ A p d \exp \left( -\frac{B p d}{V_z} \right) \right] = \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (9)$$

$$A p d \exp \left( -\frac{B p d}{V_z} \right) = \ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right) \quad (10)$$

Položme pro daný plyn a materiál katody

$$\ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right) = C \quad (11)$$

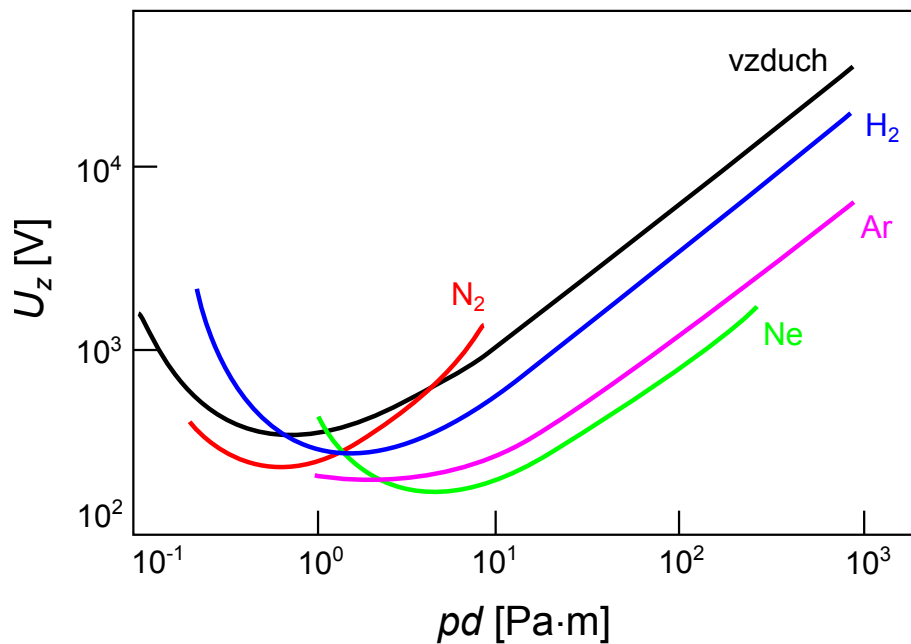
Z rovnice (10) dostáváme

$$\exp \left( -\frac{B p d}{V_z} \right) = \frac{C}{A p d} \quad (12)$$

$$-\frac{B p d}{V_z} = \underbrace{\ln C - \ln A}_{C'} - \ln(p d) \quad (13)$$

$$V_z = \frac{B p d}{C' + \ln(p d)} \quad (14)$$

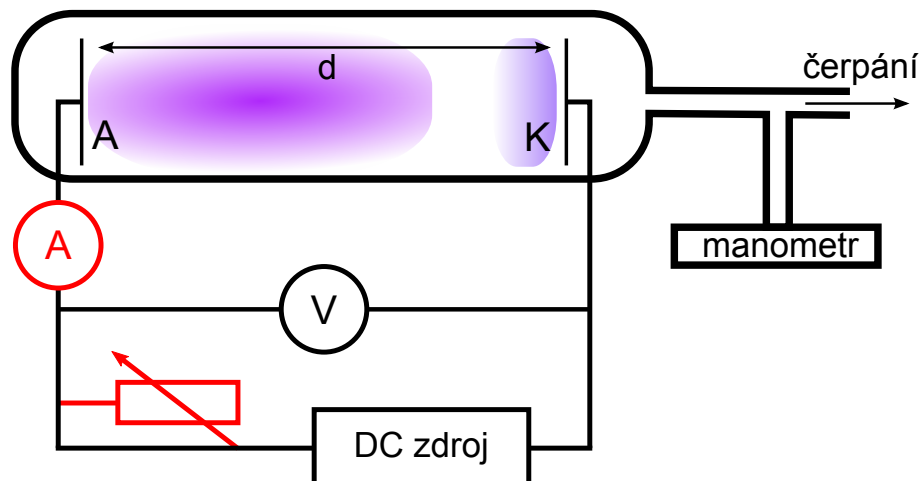
Závislost  $V_z$  na  $(p d)$  se nazývá Paschenův zákon. Tato funkce vykazuje ve svém průběhu minimum (vid' Obr. 1).



Obrázek 1: Paschenove krivky pro různé plyny.

## 2 Měření

Ověření Paschenova zákona provedeme na výbojce s pohyblivými elektrodami pro tlak plynu v rozmezí 10 Pa až 1000 Pa. Tlak měříme Piranicho manometrem a zápalné napětí určíme voltmetrem s vysokým vstupním odporem v zapojení podle obrázku 2.



Obrázek 2: Schema zapojení pro měření Paschenovy křivky. Červeně zvýrazněné části jsou zapojeny jenom v druhé části tohoto praktika, týkající se měření voltampérové charakteristiky doutnavého výboje.

Napětí na výbojce zvolna zvyšujeme a odečítáme hodnotu napětí v okamžiku zapálení výboje. Před dalším měřením vyčkáme alespoň 60 s, než dojde k rekombinaci všech nábojů ve výbojce. Do grafu vyneseme závislost  $V_z = f(pd)$  pro konstantní  $p$  pro jednu sérii měření a konstantní  $d$  pro druhou sérii měření.

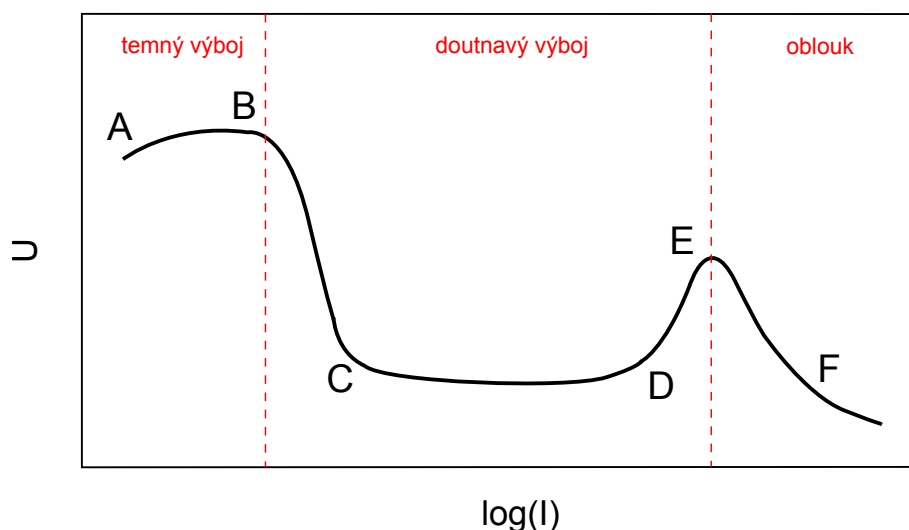
## 2.1 Úkoly

1. Naměřte a do grafu vynesete Paschenovu křivku pro různé vzdálenosti elektrod  $d$  při konstantním tlaku  $p$ . Křivku nafiťujte podle vztahu (14).
2. Naměřte a do grafu vynesete Paschenovu křivku pro různé tlaky  $p$  při konstantní vzdálenosti elektrod  $d$ . Křivku nafiťujte podle vztahu (14).

### 3 Katodový spád potenciálu v doutnavém výboji

#### 3.1 Úvod

Elektrická vodivost plynu není konstantní, ale mění se v závislosti na proudu procházejícím výbojem. Stanovení voltampérové charakteristiky provádíme buď staticky nebo dynamicky, pomocí elektronového oscilogramu. Statickou metodou určíme voltampérovou charakteristiku tak, že měříme napětí na výbojce v závislosti na proudu, tekoucím výbojem,  $U = f(I)$ . Na obr. 3 je uvedena voltampérová charakteristika samostatného výboje. V některých oblastech charakteristiky proud vzrůstá při konstantním napětí na elektrodách a dokonce i při klesajícím napětí, např. v úseku BC. Tento jev můžeme vysvětlit vznikem prostorového náboje a změnou původního elektrického pole, vytvářeného napětím na elektrodách.



Obrázek 3: Voltampérová charakteristika samostatného výboje.

Je-li tvar pole vzniklého v důsledku prostorového náboje takový, že ionizace ve výboji vzrůstá, pak proud samovolně narůstá. Při tom může napětí na elektrodách klesat, dostáváme pak klesající část voltampérové charakteristiky. V opačném případě, když elektrické pole vytvořené prostorovým nábojem vytváří horší podmínky ionizace, pak chceme-li zvýšit proud výbojem, je nutné zvýšit napětí na elektrodách. Pak jsme v oblasti rostoucí voltampérové charakteristiky.

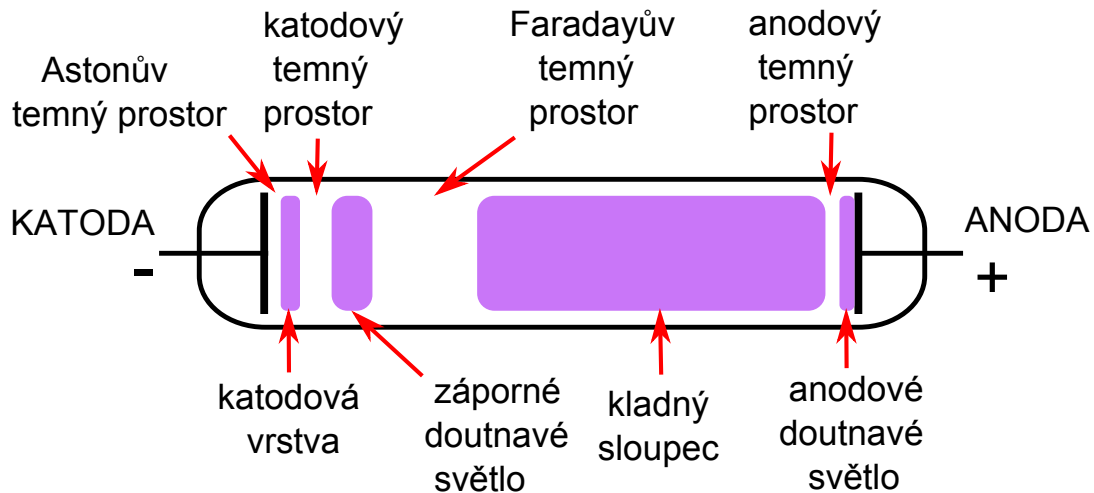
Zvyšování proudu v oblasti CD nelze vysvětlit vzrůstem drejfové rychlosti nabitých částic, neboť se zde nemění napětí na elektrodách. Musí se tedy měnit celkový počet částic, procházejících průřezem trubice. Pro celkový počet částic máme  $N = \int_a n \, dS$ . Zde  $n$  je koncentrace nabitých částic ve výboji. V katodové oblasti normálního doutnavého výboje vzrůstá  $N$  v důsledku vzrůstu  $S$  (t.j. plochy katodové plošky) v kladném sloupci však vzrůstá koncentrace  $n$ .

Napětí ve výbojce se skládá z napětí na katodové oblasti a ze spádu napětí na kladném sloupci. Při malých proudech zůstává katodový spád potenciálu konstantní, napětí na kladném sloupci však klesá s rostoucím proudem. Protože v kladném sloupci klesá intenzita pole, musí vzrůst proud zde být zajištěn velmi rychlým růstem koncentrace nabitých částic. Vzroste-li proud tak, že celá katoda je pokryta záporným světlem, přecházíme do oblasti anodálního doutnavého výboje. Napětí na katodové oblasti vzrůstá. Tento vzrůst napětí je větší než pokles na kladném sloupci. Důsledkem toho je vzrůstající oblast vol-

tampérové charakteristiky DE. Oblast EF odpovídá přechodu v oblouk.

### 3.2 Doutnavý výboj

Výboj, při kterém katoda emituje elektrony vlivem dopadajících částic nebo světelných kvant, vznikajících ve výboji, se nazývá doutnavý výboj. Pole katody je dáno prostorovým nábojem a tepelné jevy nejsou podmínkou existence tohoto typu výboje. V rozmezí tlaku 13 až 130 Pa je možno pozorovat v doutnavém výboji střídající se temné a svítící oblasti, viz obr. 4.



Obrázek 4: Doutnavý výboj.

Vznik jednotlivých oblastí můžeme vysvětlit, všimněme-li si pohybu elektronů od katody k anodě. Elektron se počiná pohybovat od katody s malou energií. Nemůže vyvolat nabuzení molekul, pokud jeho energie nedosáhne nejnižšího budícího potenciálu (5-10 eV). Tato oblast odpovídá Astonovu temnému prostoru. V katodové vrstvě již elektrony mají energii, odpovídající maximu funkce nabuzení molekul. V katodovém temném prostoru již většina elektronů má energii vyšší, než je optimální hodnota pro nabuzení. Intenzita záření temného katodového prostoru je proto velmi malá. Energie elektronů vzrůstá na konci tohoto prostoru tak, že může docházet k ionizaci plynu. Vzniká zde velký počet kladných iontů i nových elektronů s malou energií. Pomalé elektrony postupují dále k anodě a způsobují nabuzení molekul v oblasti záporného světla. Energie elektronů při srážkách klesá až pod nejnižší budící energii - objevuje se Faradayův temný prostor. Ke konci tohoto prostoru vzrůstá poněkud intenzita elektrického pole. V tomto poli elektrony získávají postupně energii, rekombinace s ionty klesá a posléze jejich energie vzroste tak, že jsou znovu schopny nabudit molekuly plynu. Objevuje se svítící kladný sloupec. Elektrické pole v kladném sloupci je o několik řádů menší než v katodové oblasti. Ionizace a nabuzení zde nastává v důsledku chaotického pohybu elektronů. U anodového konce kladného sloupce vzniká anodový spád potenciálu v důsledku prostorového náboje. Elektron vystupuje z kladného sloupce malou rychlostí. Po průchodu anodovým temným prostorem získává energii potřebnou k nabuzení a ionizaci plynu. Proto je anoda pokryta anodovým světlem.

### 3.3 Normální katodový spád potenciálu.

Pod pojmem katodový spád potenciálu rozumíme obvykle napětí mezi ostrou hranicí záporného světla a katodou. Velikost katodového spádu potenciálu můžeme určit ze stacionárního stavu doutnavého výboje. Podmínkou stacionárního stavu výboje je, že každý elektron emitovaný katodou musí vytvořit tolik iontů, metastabilních atomů, světelných kvant a p., že tyto způsobí emisí dalšího elektronů. Nechtě  $\gamma$  je počet elektronů, emitovaných katodou, dopadne-li na ní jeden iont (zahrnujeme zde i vliv ostatních částic). Dále  $\alpha$  je počet párů iontů, vytvořených elektronem na jednotkové dráze ve směru pole. Pak celkový počet elektronů, které se objeví ve vzdálenosti  $d$  od katody, t.j. na hranici katodového temného prostoru a záporného světla, v důsledku jednoho elektronu, emitovaného katodou bude

$$\exp\left(\int_0^d \alpha dx\right) \quad (15)$$

Počet iontů je menší o jeden. V stacionárním stavu tedy musí platit

$$\gamma \left[ \exp\left(\int_0^d \alpha dx\right) \right] = 1 \quad \text{a dále} \quad \int_0^d \alpha dx = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (16)$$

Integrál udává počet ionizujících srážek v intervalu  $d$ . Můžeme přibližně psát

$$\int_0^d \alpha dx = \bar{\alpha}d \doteq \frac{V_k}{\eta} \quad (17)$$

Kde  $\bar{\alpha}$  je střední hodnota ionizačního koeficientu ve studovaném intervalu,  $\eta$  je rozdíl potenciálu, který elektron musí projít, aby vytvořil jeden pár iontů. Z rovnice (16) a (17) dostáváme

$$V_k = \eta \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (18)$$

Z rovnice (18) je patrné, že katodový spád potenciálu  $V_k$  závisí na materiálu elektrod a na plynové náplni.

## 4 Měření

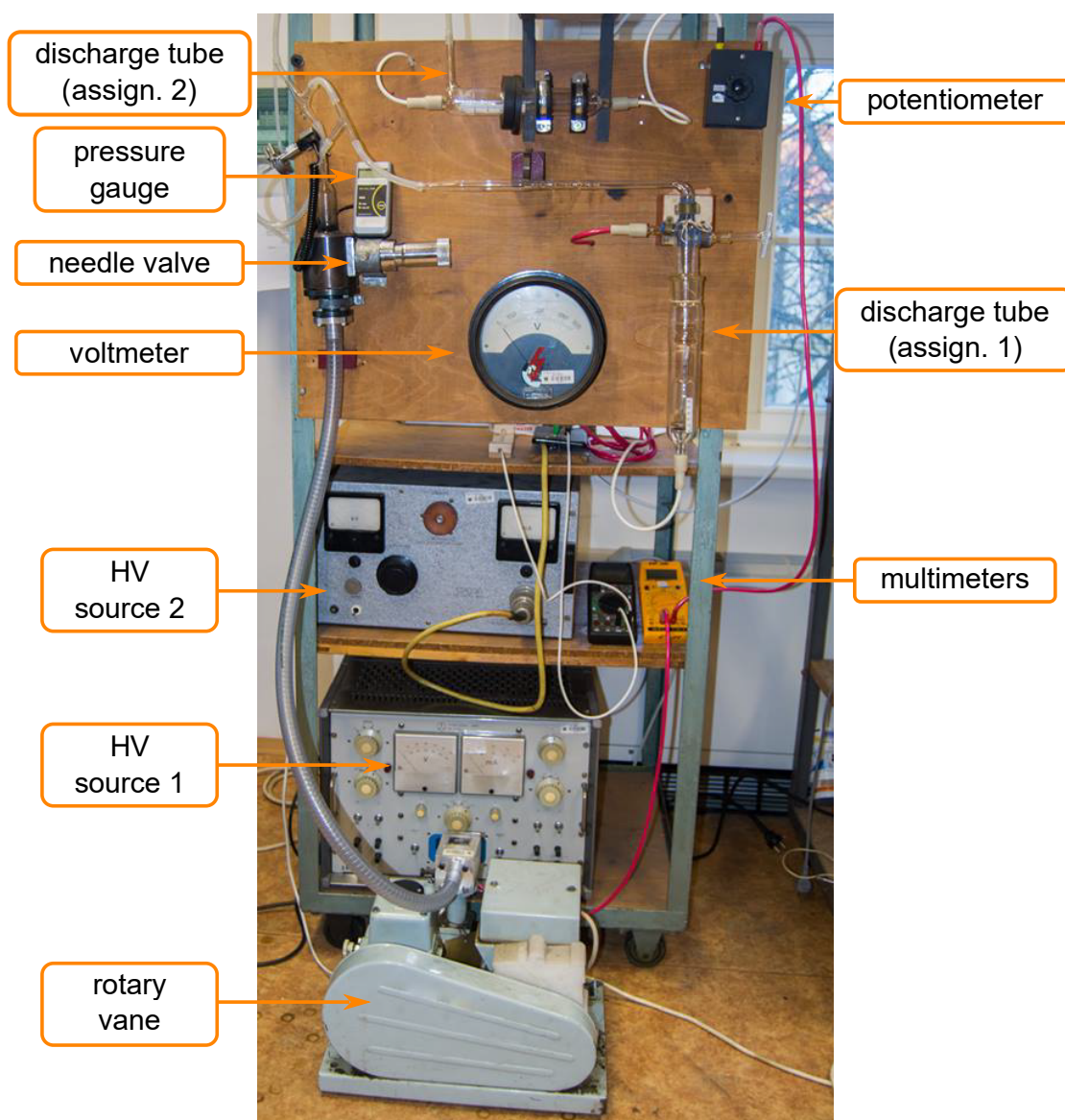
Nejdříve připravíme výbojku pro měření. Rotační vývěvou ji vyčerpáme a pomocí ventilu napouštíme vzduch na tlak 130 Pa. Tlak měříme Piraniho manometrem. Pak přistoupíme k měření voltampérové charakteristiky. Měření provedeme pro tři různé vzdálenosti elektrod v zapojení podle obr. 2 berouc v potaz červeně zvýrazněné části. Proud nastavujeme proměnným odporem. Závislosti  $U = f(I)$  vyznačíme do jednoho grafu.

Stanovení katodového spádu potenciálu provedeme metodou ztíženého výboje. Výbojový proud udržujeme konstantní. Pohyblivou anodu přibližujeme ke katodě a odečítáme napětí na výbojce v závislosti na vzdálenosti elektrod. Jakmile se dostane anoda do oblasti záporného světla, zmizí anodové světlo. Při dalším zmenšování vzdálenosti elektrod počne napětí na výbojce vzrůstat. Vzrůst napětí lze vysvětlit ztížením ionizace, v důsledku toho, že zmizí záření, které hraje důležitou roli v mechanismu vytváření katodového spádu napětí. Vyneseme-li do grafu závislost  $U = f(d)$  při konstantním proudu, pak minimální hodnota napětí  $U_k$  jest katodový spád potenciálu. Měření katodového spádu potenciálu provedeme pro tři různé hodnoty proudu z oblasti normálního doutnavého výboje.

Při měření voltampérových charakteristik i katodového spádu  $U_k$  sledujte vizuální změny nastávající ve výboji a popište je v protokolu.

#### 4.1 Úkoly

1. Stanovte voltampérovou charakteristiku samostatného výboje pro tři různé vzdálenosti elektrod.
2. Naměřte normální katodový spád potenciálu v doutnavém výboji pro tři různé proudy výbojem.



Obrázek 5: Experimentální uspořádání: 1 - výbojová trubice, 2 - zdroj napětí, 3 - ampermetr, 4 - voltmetr, 5 - rotační olejová vývěva, 6 - Piraniho manometr, 7 - jehlový ventil