

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská



**Elektronové dělo a detekce
elektronového svazku**

Ekaterina Eremenko, Anežka Kabátová, Jakub Kubát,
Tomáš Novák, Monika Robotková, Jaroslav Štorek,
Tomáš Truhlář, Matěj Vaculčíak

22. července 2019

Členové kolaborace

Koordinátor projektu
Tomáš Truhlář

Mluvčí projektu
Anežka Kabátová

Konstrukce elektronového děla
Monika Robotková
Jaroslav Štorek
Tomáš Novák
Tomáš Truhlář

Fokusace elektronového svazku
Ekaterina Eremenko
Jakub Kubát

Měření elektronového svazku
Anežka Kabátová
Matěj Vaculčiak

Obsah

Úvod	9
1 Elektrické výboje	11
1.1 Teorie elektrického výboje	11
1.1.1 Samostatné výboje	11
1.2 Přivedení vodičů k elektrodám	13
1.3 Pozorování a diskuse	14
1.4 Závěr	15
2 Zdroj elektronů, ES40-PS	17
Shrnutí	21
Reference	22

Seznam obrázků

1	Kralík a Pan Myšák před začátkem projektu.	9
1.1	Zápalné napětí různých plynů [1]. ($1 \mu\text{bar} = 0,1 \text{ Pa}$)	12
1.2	Paschenova křivka pro vzduch z roku 2011 [2]. ($\text{Torr}\cdot\text{cm} = 133 \text{ Pa}\cdot\text{cm}$)	12
1.3	Ekvipotenciální plochy v doutnavém výboji při 100 Pa [3].	13
1.4	Funkce $f(x)$ je vykreslená Paschenova křivka (1.1) pro hodnoty $A = 2737,5 \frac{\text{V}}{\text{kPa}\cdot\text{cm}}$, $B = 112,5 \frac{\text{V}}{\text{kPa}\cdot\text{cm}}$ a $\eta_+ = 3$.	13
1.5	Pozorovaný fialový doutnavý výboj při tlaku zhruba 100 Pa .	15
1.6	Pozorovaný jiskrový výboj při tlaku zhruba 10^{-2} Pa .	15
2.1	Schéma zapojení a ukázka předního ovládacího panelu stanice ES40-PS	17
2.2	Ukázka nastavení parametrů zdroje elektronů	18

Seznam tabulek

Úvod

Za úkol na předmětu Projektové Praktikum bylo zadáno navrhnout a následně sestrojit aparaturu pro urychlování svazku elektronů, což zahrnuje návrh a realizaci zapojení elektronového děla, zdroje vysokého napětí, doplňující soustavu fokusující svazek a v neposlední řadě samotný detektor intenzity elektronového svazku [5, 6].



Obrázek 1: Kralík a Pan Myšák před začátkem projektu.

Kapitola 1

Elektrické výboje

Při přípravě elektronového svazku jsme se snažili, aby byl dostatečně energetický pro dosažení prahu detekce použitého detektoru. Proto jsme cílili na dosažení elektronového svazku o energii zhruba 80 keV. Urychlení jsme prováděli pomocí rozdílu elektrického potenciálu na měděných elektrodách použitím zdrojů kladných pólů napětí.

K dosažení zamýšlené energie elektronového svazku jsme použili zdroj vysokého napětí (HV) s rozsahem až do 100 kV a dva zdroje o maximálním rozsahu 5 kV. Experiment jsme prováděli ve vakuové komoře. U průchodky do vakuové komory jsme však nebyli schopni elektrody od sebe izolovat z důvodu špatné přístupnosti, takže jak z vnitřní, tak z vnější strany byla vzdálenost mezi elektrodami menší než jeden centimetr. V tomto místě hrozilo, že dojde k elektrickému výboji.

1.1 Teorie elektrického výboje

Základním dělením elektrických výbojů je dělení na samostatné a nesamostatné [1]. Nesamostatné výboje jsou vázány na vnější (tzv. ionizační) činidlo, bez kterého nemohou probíhat. Ionizačním činidlem mohou být například elektrony vystupující ze žhavené katody nebo ozařování výbojového prostoru rentgenovými paprsky. Pokud se výboj může udržet, i když ionizační činidlo nepůsobí, nazýváme ho samostatným. Takovými výboji jsou výboje temné, doutnavé, obloukové, jiskrové, vysokofrekvenční a koróny. Dále rozebereme doutnavé a jiskrové výboje [1].

1.1.1 Samostatné výboje

Teorie samostatného výboje vznikla z rozšíření teorie nesamostatného výboje. Teorie nesamostatných výbojů je založena na myšlence Townsendových lavin, kdy žhavená katoda produkuje stálý počet elektronů za jednotku času, které dále ionizují částice plynu mezi elektrodami a produkují se laviny. U samostatného výboje již uvažujeme dostatečně vysoké napětí mezi elektrodami, že ionizační činidlo není zapotřebí a výboj probíhá pomocí vysokého počtu ionizací nárazem.

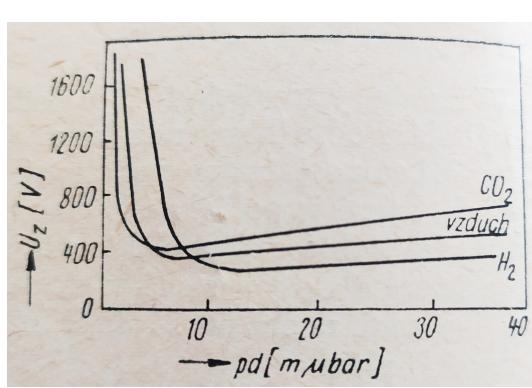
Minimální napětí na elektrodách, které je potřeba ke vzniku výboje U_z , tj. zápalné napětí samostatného výboje, lze podle Townsenda vypočítat jako [1]

$$U_z = A \frac{pd}{\ln \left[B \frac{pd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\eta_+} \right)} \right]} , \quad (1.1)$$

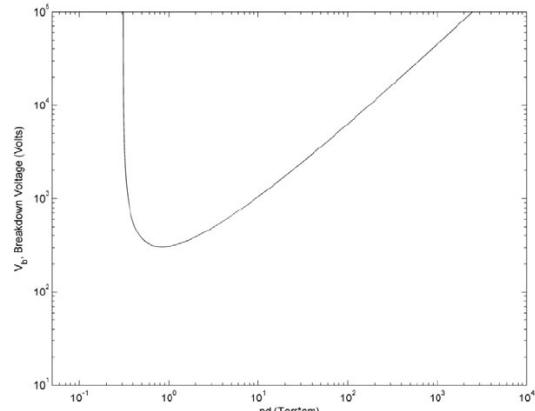
kde $A = BU_i$ a U_i je ionizační napětí, $B = \frac{1}{p\lambda_e}$ je počet srážek na jednotku dráhy elektronu při jednotkovém tlaku prostředí, kde λ_e je střední volná dráha elektronu, p je tlak, d je vzdálenost elektrod a η_+ charakterizuje vlastnosti materiálu katody, které ovlivňují pravděpodobnost emise elektronů z katody kladnými ionty (koeficient sekundární emise elektronů). Rovnice (1.1) je nazývána Paschenovým zákonem. Bylo zjištěno, že konstanty A a B se nemění v oblasti $E/p = 450 - 7500 \frac{\text{V}}{\text{kPa}\cdot\text{cm}}$ (E je elektrická intenzita) a jsou rovny $A = 2737,5 \frac{\text{V}}{\text{kPa}\cdot\text{cm}}$ a $B = 112,5 \frac{\text{V}}{\text{kPa}\cdot\text{cm}}$ [7].

Průběh zápalného napětí různých plynů je znázorněn na Obr. 1.1, specálně pro vzduch na Obr. 1.2. Zápalné napětí U_z nabývá minima v [1]

$$(pd)_{min} = \frac{2,781}{B} \ln \left(1 + \frac{1}{\eta_+} \right) . \quad (1.2)$$



Obrázek 1.1: Zápalné napětí různých plynů [1]. ($1 \mu\text{bar} = 0,1 \text{ Pa}$)



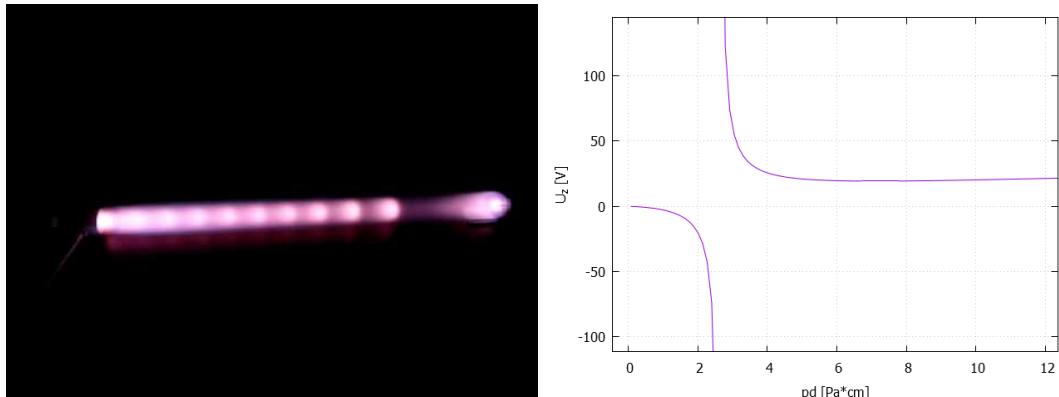
Obrázek 1.2: Paschenova křivka pro vzduch z roku 2011 [2]. ($\text{Torr}\cdot\text{cm} = 133 \text{ Pa}\cdot\text{cm}$)

Doutnavý výboj

Přechod od nesamostatného výboje k samostatnému je doprovázeno vznikem proudu a světélkováním plynu. Pro doutnavý výboj jsou charakterizující světélkující oblasti především u anody, kde dochází k nejvíce srážkám elektronů s molekulami plynu [1]. V závislosti na rozložení prostorových nábojů se průběh potenciálu mezi katodou a anodou deformauje a světélkující oblasti se nacházejí i dále od anody. Rozložení prostorových nábojů se mění i s tlakem [3]. Na Obr. 1.3 je znázorněn doutnavý výboj ve vzduchu při tlaku 100 Pa.

Jiskrový výboj

Jiskrový výboj je nestabilní a nestacionární forma samostatného výboje, která nevyžaduje působení ionizačního činidla [1]. Má vzhled jasně svítících větvících se kanálů o vysoké teplotě a v plynu je doprovázen akustickými jevy. Přestože se při jiskrových výbojích uplatňuje jiný princip vzniku než při výboji lavinovém, tzv. kanálový mechanismus, platí pro ně Paschenův zákon (1.1) [1]. Jelikož se součinitel η_+ vyskytuje v Paschenově zákoně ve tvaru $\ln \ln \eta_+$, materiál katody nemá vliv na velikost U_z [1]. Zápalné napětí je nazýváno napětím průrazu a u vzduchu činí toto průrazné napětí při normální teplotě a tlaku $3 \text{ MV/m} = 30 \text{ kV/cm}$ [8].



Obrázek 1.3: Ekvipotenciální plochy v doutnavém výboji při 100 Pa [3].

Obrázek 1.4: Funkce $f(x)$ je vykreslená Paschenova křivka (1.1) pro hodnoty $A = 2737,5 \frac{\text{V}}{\text{kPa}\cdot\text{cm}}$, $B = 112,5 \frac{\text{V}}{\text{kPa}\cdot\text{cm}}$ a $\eta_+ = 3$.

1.2 Přivedení vodičů k elektrodám

K elektrodám, které sloužily jak pro urychlení, tak i k fokusaci elektronového svazku, jsme přiváděli jeden vodič s napětím vyšším než 20 kV a dva s napětím do 5 kV . Nejprve jsme se pokoušeli použít jedinou průchodku, u které byly všechny sousední vodiče vzdáleny méně než jeden centimetr. Podle teorie by k výboji na vzduchu mělo docházet při zhruba $20 \text{ kV}/0,7 \text{ cm}$, což nebylo pro naše účely nedostatečné a vysoké napětí jsme přiváděli samostatnou průchodkou.

Samostatná průchodka však nebyla uzpůsobena k vedení vysokého napětí a opět byl vodič vzdálen zhruba 1 cm od uzemněné vakuové komory. I přes naši snahu nechráněné části průchodky co nejvíce izolovat vulkanickou páskou jsme při překročení napětí 30 kV na vzduchu výboje pozorovali. Vysokonapěťovou keramicky izolovanou průchodku jsme bohužel k dispozici neměli.

Uvnitř komory byly jednotlivé elektrody vzdáleny od sebe navzájem a od uzemněné komory také přibližně jeden centimetr. Abychom mohli použít výpočet pomocí Paschenova zákona (1.1), je potřeba, aby podíl elektrické intenzity E a tlaku p byl v rozmezí $E/p = 450 - 7500 \frac{\text{V}}{\text{kPa}\cdot\text{cm}}$. Námi cílený tlak byl ideálně co nejmenší, abych

se náš elektronový svazek nerozptyloval na molekulách vzduchu, tedy $10^{-2} - 10^{-4}$ Pa. Pro napětí U v řádu kilovoltů však ze vztahu $E = U/d$ dostáváme pro $d = 1$ cm $E/p \sim 10^9 \frac{V}{kPa \cdot cm}$. I kdybychom se rozhodli toto omezení nerrespektovat, zjistíme, že z Paschenova zákona dostaneme pro námi zamýšlené hodnoty $p = 10^{-3}$ Pa a $d = 1$ cm nesmyslný výsledek $U_z < 0$ ¹, jelikož má závislost (1.1) průběh hyperboly (Obr. 1.4). Proto jsme neexistenci výboje v komoře odhadovali pouze na základě úvahy, že při dosaženém nízkém tlaku nebude pro výboj k dispozici dostatečný počet ionizovatelných molekul.

1.3 Pozorování a diskuse

Při prvních zkouškách jsme dosahovali tlaku zhruba 100 Pa a při použitém napětí 3 kV jsme pozorovali fialový doutnavý výboj (Obr. 1.5). Naše pozorování se shoduje s očekáváním z Obr. 1.3. Současně jsme však nepozorovali žádný signál elektronů na stínítku. Použité wolframové vlákno pravděpodobně nebylo vhodným zdrojem elektronů.

Další pokusy jsme prováděli při tlaku přibližně 10^{-2} Pa². Při nich jsme již nepozorovali doutnavý výboj, ale při dosažení napětí 20 kV na urychlovací elektrodě jsme v komoře pozorovali výboje doprovázené zelenými záblesky. Pravděpodobně se jednalo o elektrony vzniklé při výboji, které dopadly na instalované fluorescenční stínítko, jelikož jsme stejně zelené světlo pozorovali na stínítku při dopadu elektronů z funkčního elektronového děla. Tyto výboje se v závislosti na použitém napětí pravidelně opakovaly a se zvyšujícím se napětím se časové intervaly mezi nimi zkracovaly. Do komory jsme viděli malým průzorem a záblesk vždy osvítil celou komoru, takže jsme ani nebyli schopni určit, kde k výbojům dochází. Výboje jsme pozorovali i v případě, kdy jsme zapojili pouze jednu elektrodu s nejvyšším urychlovacím napětím, domníváme se proto, že docházelo k výboji do komory v místě, kde byla vzdálenost elektrody od komory nejkratší. Při jednom výboji jsme dokonce pozorovali jasný jiskrový výboj (Obr. 1.6), ovšem na jiném místě.

Při použití napětí vyššího než 30 kV jsme pozorovali výboje již u průchodky vysokého napětí z vnějšku komory na vzduchu. Výbojům jsme se snažili zabránit zvýšenou izolací vodičů vulkanickou páskou a plastovou ohebnou trubkou. Neúspěšně. Pro měření s detektorem dodaným od druhé skupiny jsme proto volili pouze urychlovací napětí do 18 kV, aby detektor výboje nepoškodily, což zkomplikovalo měření, protože jsme nedosáhli cílené energie elektronů 80 keV.

Navzdory našemu očekávání docházelo k výbojům ve vyčerpané vakuové komoře při nižším napětí než na vzduchu. Pro tento jev nemáme uspokojivé vysvětlení. Navíc při tlacích menších než 1,3 Pa by nemělo docházet k žádným elektrickým výbojům při jakémkoli napětí [10]. Výboje by snad odstranilo použití keramické vysokonapěťové průchodky.

¹Použili jsme $A = 2737,5 \frac{V}{kPa \cdot cm}$, $B = 112,5 \frac{V}{kPa \cdot cm}$ a $\eta_+ = 3$ [9]. Volba jiného η_+ v rozmezí $\eta_+ = 2 - 100$ výsledek nemění.

²Jelikož se nám ke konci semestru porouchal tlakoměr, dosažený tlak řádu 10^{-2} Pa jsme odhadovali na základě alespoň třídenního čerpání vakuové komory turbomolekulární vývěrou.



Obrázek 1.5: Pozorovaný fialový doutnavý výboj při tlaku zhruba 100 Pa.



Obrázek 1.6: Pozorovaný jiskrový výboj při tlaku zhruba 10^{-2} Pa.

1.4 Závěr

K urychlení elektronů jsme se na elektrody do vakuové komory snažili přivést napětí řádu 5 kV a vysoké napětí řádu 80 kV. K vedení vysokého napětí jsme použili samostatnou průchodu, která však stejně jako původně použitá nevyhovovala podmínkám vedení vysokého napětí a při napětí vyšším než 18 kV uvnitř komory a napětí vyšším než 30 kV z vnějšku komory probíjela. Tyto hodnoty jsme proto nepřekračovali. Průchodka pro vedení napětí řádu 5 kV byla dostatečná a výboje jsme nepozorovali.

Navrhovaným řešením výbojů je použití keramické průchodky uzpůsobené k vedení vysokého napětí.

Kapitola 2

Zdroj elektronů, ES40-PS

Z důvodů problémů s nedostatkem elektronů z wolframového vlákna žárovky jsme se rozhodli k použití ES40-PS jako zdroje elektronů. ES40-PS je *Electron Source Power Supply* poskytující svazek elektronů s nastavitelnou energií, hustotou, pozicí a profilem svazku. Dále umožňuje skenování oblasti s nastavitelnou rychlosťí skenování.

Schéma zapojení zdroje elektronů ES40-PS je znázorněno na Obr. 2.1 vlevo. Zdroj elektronů je upevněn pomocí průchodky do vakuové komory a připojen ke stanici ES40-PS pomocí kabelu s 6-pinovou spojkou. Na Obr. 2.1 vpravo je zobrazena ukázka ovládacího panelu stanice ES40-PS.



Obrázek 2.1: Vlevo: Schéma zapojení zdroje elektronů ES40-PS. Vpravo: Ukázka předního ovládacího panelu stanice ES40-PS. Převzato z [4].

Zdroje elektronů ES40-PS má několik nastavitelných parametrů:

- **Urychlovací napětí** je nastavitelné od 0 kV do 5 kV
- **Emisní proud** elektronů je nastavitelný v rozmezí od 0,01 μ A do 300,00 μ A
- **Fokusovací napětí** je spojené s urychlovacím a lze nastavit od 60,0 % do 99,9 %
- **Wehneltovo napětí** od 0 V do 300 V

Elektrony vychází ze zahřívání wolframové katody, z tohoto důvodu se může objevit zpráva "Current Limit", kdy je zapotřebí více času ke stabilizaci emisního proudu.

Zmíněné hodnoty je možné nastavit na úvodní obrazovce ovládacího panelu viz

Obr. 2.2. Po kliknutí na zmenšený seznam hodnot nacházející se v levé části se display přepne do druhé polohy, kde je možné nastavit následující hodnoty:

- **Horizontální výchylka PX** je nastaviteľná v rozmezí od $-5,00$ mm do $5,00$ mm
- **Vertikální výchylka PY** je nastaviteľná v rozmezí od $-5,00$ mm do $5,00$ mm
- **Horizontální rozsah skenu dX** je nastaviteľný v rozmezí od $0,00$ mm do $10,00$ mm
- **Vertikální rozsah skenu dY** je nastaviteľný v rozmezí od $0,00$ mm do $10,00$ mm
- **TPD hodnota (time per dot)** je nastaviteľný v rozmezí od $20 \mu\text{s}$ do 30 ms

Při současném nastavení výchylky a skenu se může objevit zpráva "SCAN X/Y OVERFLOW", která značí překročení fyzikálního rozsahu zdroje elektronů ES40-PS a pro její odstranění je nutné snížit výchylku svazku nebo rozsah skenování.



Obrázek 2.2: Ukázka nastavení parametrů zdroje elektronů a přepnutí do druhého menu. Převzato z [4]

Spuštění zdroje elektronů ES40-PS krok za krokem:

1. Po zapnutí napájení by měl být zdroj ponechán v režimu *STAND-BY* alespoň 10 minut pro řádné zahřátí a stabilizaci katody
2. Pokud zdroj nebyl použit delší dobu následuje *DEGAS* procedura
3. Následuje zapnutí do *OPERATE* módu, ale pouze v případě je-li tlak v komoře nižší než 5×10^{-6} mbar
4. Doporučené začínající hodnoty jsou: Energie = 3 kV , Emise = $100 \mu\text{A}$, Fokusace = 70% , Wehneltovo napětí = 85 V , PX = PY = dX = dY = 0 mm

DEGAS procedura

1. Před zapnutím do *OPERATE* módu je nutné nastavit všechny napětí a proudy na minimum.
2. Po zapnutí do *OPERATE* módu je nutné nastavit následující parametry v daném pořadí: Energie = $2,00 \text{ kV}$, Fokusace = $88,0 \%$ a Wehneltovo napětí = $71,0 \text{ V}$
3. Zvýšení Emise na $300,00 \mu\text{A}$

4. S tímto nastavením by mělo zařízení pracovat 10 minut
5. Následně by měla být emise snížena na minimum a poté i zbývající napětí

Během *DEGAS* procedury by měli být parametry zvyšovány postupně se současnou kontrolou tlaku v komoře. Pokud dojde k náhlému poklesu vakua v komoře, mělo by být zařízení ponecháno se stávajícími parametry dokud nedojde k obnovení vakua.

Více podrobností k ovládání zdroje elektronů ES40-PS je popsáno v operačním manuálu [4].

Shrnutí

Literatura

- [1] J. Kracík, J. B. Slavík, and J. Tobiáš, *Elektrické výboje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [2] A. Martins and M. Pinheiro, “On the propulsive force developed by asymmetric capacitors in a vacuum,” *Physics Procedia*, vol. 20, pp. 112–119, 2011.
- [3] M. Králová, “Výboj při sníženém tlaku.”
- [4] Precision and Vacuum Technology, “ES40-PS Electron Source Power Supply,” February 2018.
- [5] P. Mysak, *Koucor v bote*. New York: Springer, 2002.
- [6] Kralik, “Kralikarna in the reaction $pp \rightarrow pp\pi^+\pi^-$ at 69 GeV/c ,” *Nuclear Physics B*, vol. 98, no. 2, pp. 189–203, 1975.
- [7] E. Husain and R. S. Nema, “Analysis of paschen curves for air, n2 and SF6 using the townsend breakdown equation,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-17, pp. 350–353, Aug. 1982.
- [8] P. Tipler, *College physics*. New York, NY: Worth Publishers, 1987.
- [9] Y. Bozhko, J. Barnard, and N. Hilleret, “Measurements of the Secondary Electron Emission of Some Insulators,” 1997.
- [10] M. E. Ellion, “A study of electrical discharge in low-pressure air,” tech. rep., Jet Propulsion Laboratory, 1965.