

Především bych chtěl poděkovat doktoru Pavlů za neocenitelné rady při nesčetných konzultacích a pomoc při měření, profesorce Šafránkové za opravu chyb věcných, gramatických a bránění v básnickém rozletu, profesoru Němečkovi za vedení, rady a konzultace, za čas, který z toho mála, co má věnoval i mě. Dále děkuji daňovým poplatníkům České Republiky za poskytnutí finančních prostředků (byť často nechtěné) a vládě České Republiky za, byť malou, podporu vědy a výzkumu.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a s jejím zveřejňováním.

V Praze dne

Marek Vyšinka

Obsah

1 Úvod	3
1.1 Kde je prach a proč ho studujeme	3
2 Současný stav problematiky	5
2.1 Současná aparatura	5
2.1.1 Popis	5
2.1.2 Princip měření a vyhodnocování	6
2.2 Jiné možnosti studia nabíjení	7
2.3 Důležité součásti aparatury	8
2.3.1 Elektronové dělo	8
2.3.2 Iontové dělo	9
2.3.3 Faradayův válec	9
3 Cíl práce	12
4 Experimentální uspořádání měření	13
4.1 Vakuový systém	13
4.2 Elektronové dělo	14
4.3 Faradayův válec	14
5 Výsledky a jejich diskuze	16
5.1 Měření Faradayovým válcem	16
5.1.1 Vliv hradící mřížky	16
5.1.2 Vliv pole na mřížce	17
5.1.3 Vliv ionizace	18
5.2 Stabilizace emisního proudu	20
5.2.1 Návrh stabilizačního obvodu	20
5.2.2 Ověření funkce stabilizačního obvodu	20
6 Shrnutí a závěr	23
Literatura	24

Název práce: Stabilizace emisního proudu iontového a elektronového děla

Autor: Marek Vyšinka

Katedra: Katedra elektroniky a vakuové fyziky

Vedoucí bakalářské práce: Prof. RNDr. Zdeněk Němeček, DrSc.

E-mail vedoucího: zdenek.nemecek@mff.cuni.cz

Abstrakt: Pro studium nabíjecích procesů prachových zrn je nezbytné mít iontový a elektronový svazek se stabilním proudem nezávislým na energii částic ve svazku. Ukazuje se, že komerční zdroje elektronů a iontů tuto podmínku dostatečně nespĺňují, což vede k obtížím při zpracování a interpretaci naměřených dat. Cílem této práce je navrhnout, sestavit a vyzkoušet obvod, který by tuto stabilizaci zajišťoval. Návrhu obvodu předchází studie efektů ovlivňujících měření pomocí Faradayových válců, které sloužící k detekci svazku nabitých částic. Mezi tyto efekty patří například nehomogenity elektrického pole na mřížkách či ionizace zbytkové atmosféry.

Klíčová slova: elektronové dělo, Faradayův válec, stabilizace proudu

Title: Stabilization of emission currents of ion and electron guns

Author: Marek Vyšinka

Departement: Departement of Electronics and Vacuum Physics

Supervisor: Prof. RNDr. Zdeněk Němeček, DrSc.

Supervisor's e-mail address: zdenek.nemecek@mff.cuni.cz

Abstract: The study of dust grain charging processes requires the ion or electron beam currents independent on the energy of particles in the beam. It has been found that commercial electron and ion sources do not fulfill this requirement to a sufficient degree. It leads to difficulties in processing and interpretation of measured data. The aim of this work is to design, build and test a circuit for stabilization of the beam current. The circuit design is supported by a study of certain effects influencing measurements with the Faraday cup which serves as detector of the charged particle beam. These effects include, for example, inhomogenities of the grid electric field or ionization of a residual atmosphere.

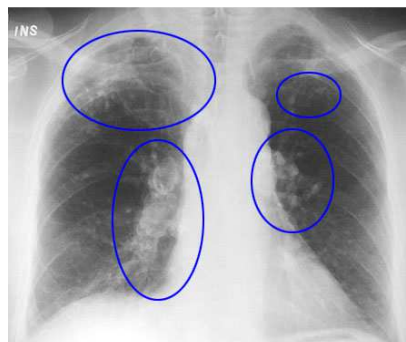
Key words: electron gun, Faraday cup, stabilization of current

Kapitola 1

Úvod

1.1 Kde je prach a proč ho studujeme

Prach nalézáme téměř všude. V lidských příbytcích nám znepríjemňuje život a musím jej utírat, uhelný prach zanáší horníkům plíce způsobující jim silikózu (obr. 1.1), prach cest zanáší vzduchové filtry automobilů, zlatý prach byl ceněným zbožím na Klondyku před více než stovkou let (obr. 1.2), prach v atmosféře po erupcích vulkánů či dopadech velkých vesmírných těles zahaluje slunce a způsobuje ochlazení naší planety, prach v horních vrstvách atmosféry způsobuje zářivá oblaka a umožňuje



Obr. 1.1: Rentgenový snímek silikózních plic (převzato z http://sprojects.mmi.mcgill.ca/icm_c/Chest/case13/page3.html).

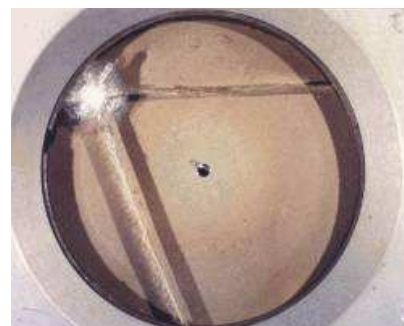


Obr. 1.2: Zlatý prach (převzato z <http://www.equatorialoil.com/pages/gold-sample.htm>).

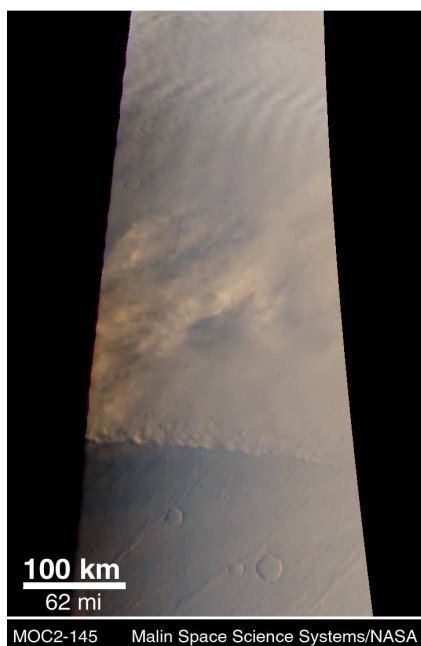
nám tak pohled na nádhernou podívanou, prach v meziplanetárním a mezihvězdném prostoru poškozují družice a sondy zásahy mikrometeority (obr. 1.3), zeslabuje světlo hvězd, tvoří chvosty komet, obaluje povrchy vesmírných těles (asteroidů, meteoroidů, planetek), pokrývá povrchy planet a měsíců (bouře na Marsu – obr. 1.4, světélkování horizontu na Měsíci), shlukuje se do nádherných prstenců obřích planet (obr. 1.5), ale snad nejkrásnějším projevem jsou prachové mlhoviny

(obr. 1.6).

Meziplanetárním prachem rozumíme drobná zrnka o velikostech desítek mikrometrů až desítek nanometrů. Jsou tvořena převážně kombinací uhlíku a křemičitanů, mohou být obalena ledem. Předpokládá se, že na jejich povrchu dochází k velkému počtu reakcí (vznik vodíkových molekul z atomárního vodíku i složitějších molekul od vody přes oxid uhličitý až po báze nukleových kyselin nacházené v mezihvězdných oblacích). Tato zrnka jsou v kosmických podmínkách nabíjena na značné potenciály (např. fotoefektem, srážkami s nabitými částicemi přichá-



Obr. 1.3: Zásah mikrometeoritu do vzorku z CaF_2 používaného v aparaturách pro měření v infračervené oblasti spektra (převzato z: http://www.irfilters.reading.ac.uk/library/technical_data/space/page09.htm).



Obr. 1.4: Prachová bouře na Marsu (převzato z: http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/image/9908/duststorm_mgs_big.jpg).

Stardust – obr. 1.7) [4] nebo zkoumat jednotlivé nabíjecí procesy působících na jedno zrnko, kterým může být i uměle připravený vzorek [5].

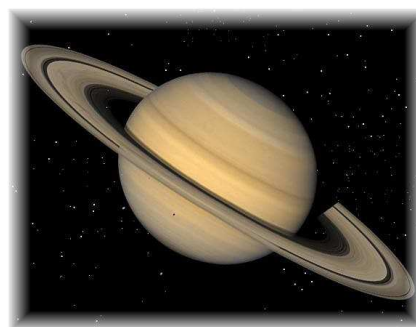
Experimentální aparatura umožňující laboratorní simulaci nabíjecích procesů je budována i na katedře EVF. Úkolem této práce bylo podílet se na návrhu jedné části této aparatury – stabilizaci proudu iontového a elektronového děla sloužících k nabíjení prachových zrn.



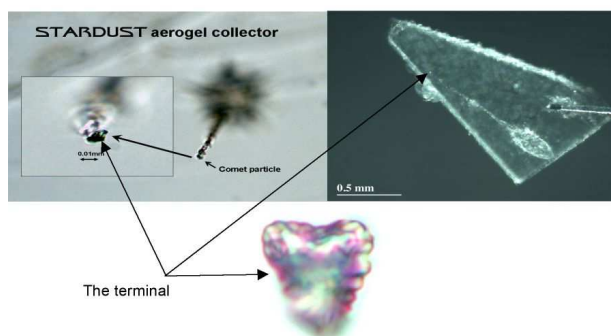
Obr. 1.6: Prachová mlhovina Koňská hlava (převzato z: http://www.nasa.gov/lb/multi/media/imagegallery/image_feature_73.html).

zejícími od Slunce i z hlubin kosmu a dalšími způsoby). Vzhledem k jejich malé hmotnosti se tak v hustších oblastech stávají elektrické síly určujícími pro chování prachových zrn. Studium nabíjecích procesů je proto klíčovým k pochopení chování mezihvězdné látky.

Meziplanetární prach můžeme zkoumat buď v přímo v kosmu, ať již v jeho přirozeném prostředí pomocí experimentů umístěných na meziplanetárních sondách (New Horizons, Ulysses,...)[1],[2], či výzkumy kolektivního chování nabitých prachových zrn prováděné na orbitální stanici MIR [3]. V laboratorních podmínkách můžeme experimentovat se skutečnými vzorky meziplanetárního prachu (sonda



Obr. 1.5: Saturn se svými prstenci (převzato z: <http://webpages.csu.s.edu/~sac21841/saturn.htm>).



Obr. 1.7: Kometární prach přivezený sondou Stardust (převzato z: <http://stardust.jpl.nasa.gov/news/status/060221>).

Kapitola 2

Současný stav problematiky

Při studiu jednotlivých nabíjecích procesů působících na prachová zrna je možné postupovat v zásadě dvěma způsoby. První je založen na levitaci jediného zrnka ve speciální pasti, kde je vystavováno nabíjecím procesům. Tento způsob je v současné době používán na KEVF a bude mu věnována první podkapitola. Druhým je propadávání zrnka prostředím, které způsobuje nabíjení zrnka. Tomuto způsobu bude věnována druhá podkapitola. Ve třetí podkapitole budou probrány součásti aparatur důležité z hlediska nabíjení (elektronové a iontové dělo) a detekce (Faradayův válec).

2.1 Současná aparatura

2.1.1 Popis

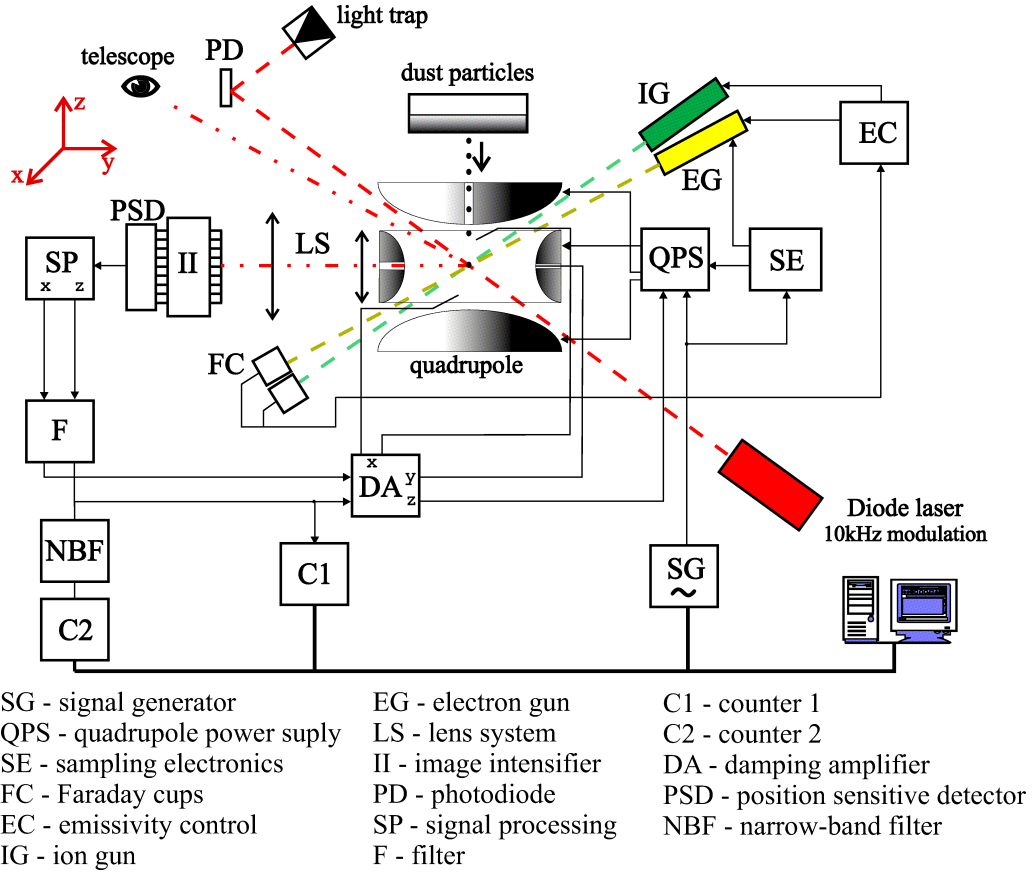
Současná aparatura pro nabíjení prachových zrn pracující na Katedře elektroniky a vakuové fyziky je založena na zachycení jednoho zrna (popřípadě klastru zrn) v elektrodynamické Paulově pasti [6]. Tam je zrno vystaveno různým vlivům vedoucím k jeho nabíjení (ultrafialový paprsek – fotoemise, elektronový a iontový svazek – záchyt primárních částic a sekundární elektronová emise) a z jeho oscilací v elektrickém poli kvadrupólu je zjišťován poměr náboje a hmotnosti (Q/m). Schéma aparatury je na obr. 2.1.

Experiment probíhá ve vysokém vakuu aby nedocházelo k ionizaci zbytkové atmosféry v aparatuře (a ovlivňování nabíjení tímto způsobem) a změnám pohybu zrna v hustém prostředí Brownovým pohybem.

Ze zásobníku prachových zrn je klepáním uvolněno zrnko, které je gravitací přitahováno k zemi a je-li nabitě a propadá-li v okolí středu kvadrupólu, je zachyceno a vykonává kmitavé pohyby kolem rovnovážné polohy (podrobněji diskutováno níže). V pasti kmitající zrnko je osvětlováno červeným diodovým laserem (vlnové délky 600–700 nm, aby nedocházelo k nechtěné fotoemisi) a obraz pohybujícího zrnka je přes optický systém zvětšen a zesílen. Pomocí polohově citlivého elementu se určí jeho poloha a tato informace se dále počítačově zpracovává. Laserový paprsek je zachycen ve světelné pasti, aby netvořil šum při detekci polohy částice.

Samotný experiment spočívá v ostřelování levitujícího zrna svazkem iontů nebo elektronů a zkoumání změn jeho náboje prostřednictvím změny frekvence kmitů v elektrickém poli. Elektronové a iontové dělo míří přes střed kvadrupólu, kde kmitá

nabíjené zrnko, do Faradayových válců, které jednak slouží k detekci a stabilizaci proudů a dále také jako pasti na primární částice, které by jinak vyvolávaly sekundární emise na stěnách aparatury a tak, nedefinovaným způsobem, ovlivňovaly podmínky experimentu [6].



Obr. 2.1: Schéma aparatury pro nabíjení prachu.

2.1.2 Princip měření a vyhodnocování

Pohybové rovnice popisující pohyb zrnka v kvadrupólu je možné přepsat do tvaru Mathieovy diferenciální rovnice [6], z jejíhož řešení je možné, za jistých zjednodušujících předpokladů, vyjádřit poměr náboje zrnka a jeho hmotnosti:

$$\frac{|Q|}{m} \cong \frac{\pi^2 r_0^2}{|\lambda_u|} \cdot \frac{f_{ac} \cdot f_u}{V_{ac}^{ef}} k, \quad (1)$$

kde r_0 je vnitřní poloměr prostřední elektrody

λ_u jsou váhové konstanty pro jednotlivé složky intenzity el. pole ($\lambda_x = \lambda_y = 1$, $\lambda_z = -2$)

V_{ac}^{ef} je efektivní hodnota střídavého napětí na každé elektrodě kvarupólu

f_{ac} frekvence tohoto napětí

f_u frekvence kmitů částice

k představuje korekční faktor pro vyšší poměry frekvence kmitů zrna f_u a napájecího napětí f_{ac} a je možné jej vyjádřit jako

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1,8 \cdot \frac{f_u}{f_{ac}}\right)^2}}. \quad (2)$$

Poloměr a hmotnost částice [7] můžeme určit pomocí vztahů

$$R = \sqrt{\frac{3\varepsilon_0}{\rho} \cdot \Phi \cdot \frac{m}{Q}} \quad (3)$$

$$m = \frac{4}{3} \pi \cdot \frac{1}{\sqrt{\rho}} \cdot \left(3\varepsilon_0 \cdot \Phi \cdot \frac{m}{Q}\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

kteří platí za předpokladu homogenních sférických zrn o hustotě ρ . Povrchový potenciál částice Φ určíme tak, že částici iontovým bombardováním nabijeme na vysoký potenciál a poté ji ostřelujeme ionty s menší energií. Tyto ionty nemohou dopadat na povrch částice, ale dopadají na stěny kvadrupólu, kde emitují sekundární elektrony vybíjející částici. Jakmile její potenciál poklesne na hodnoty odpovídající energii ostřelujících iontů, začnou tyto dopadat na povrch a vybíjení se zpomalí. Dojde tak ke zlomu ve voltampérové charakteristice vybíjecího procesu a z polohy zlomu určíme povrchový potenciál zrna. Poměr náboje a hmotnosti, Q/m , určíme výše popsaným způsobem z frekvence jeho kmitů.

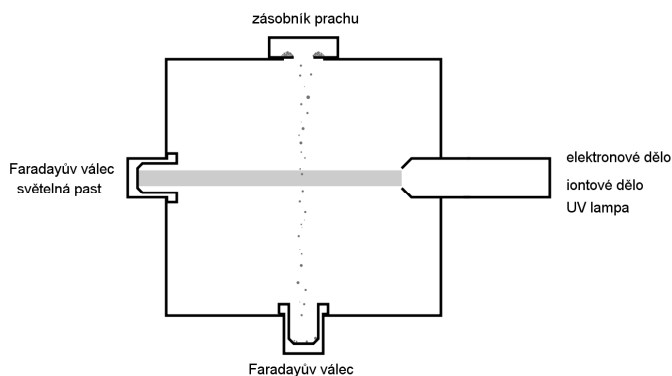
Další možností určení hmotnosti částice je metoda elementárního náboje [8]. Při ní měříme změnu frekvence kmitů odpovídající změně náboje částice o velikost elementárního náboje (či několika málo nábojů). Je tedy nutné měřit frekvenci s velkou citlivostí a zajistit aby primární částice nabíjející zrnko dopadaly na zrnko po jedné. Hmotnost zrnka potom získáme dle vztahu

$$m = \frac{e \cdot f_z}{\frac{Q}{m} \cdot \Delta f_z} \quad (5)$$

2.2 Jiné možnosti studia nabíjení prachu

Další možností studia nabíjení prachových zrn je jejich propadávání nabíjejícím prostředím a následná detekce náboje. V zásadě je tento způsob mnohem jednodušší než výše popsaný způsob zachycení zrnka v elektrodynamické pasti, ale poskytuje také mnohem méně informací. Jedinou měřenou veličinou je celkový náboj zrnka a

jiná měření není možné v tomto uspořádání provádět. Odpadá tak požadavek na kulovost částic, čímž se rozšiřuje počet vzorků, se kterými je možné analyzovat.



Obr. 2.2: Aparatura pro nabíjení prachu.

Princip této metody je patrný z obr. 2.2. Ze zásobníku prachových zrn jsou tato postupně uvolňována a propadávají nabíjejším prostředím, jímž může být světelný paprsek (fotoemise), elektronový či iontový svazek (sekundární emise), silné elekt-

rické pole (autoemise) atd. Poté zrna dopadají do Faradayova válce a registruje se celkový přenesený náboj. Tento princip byl použit např. v práci [9].

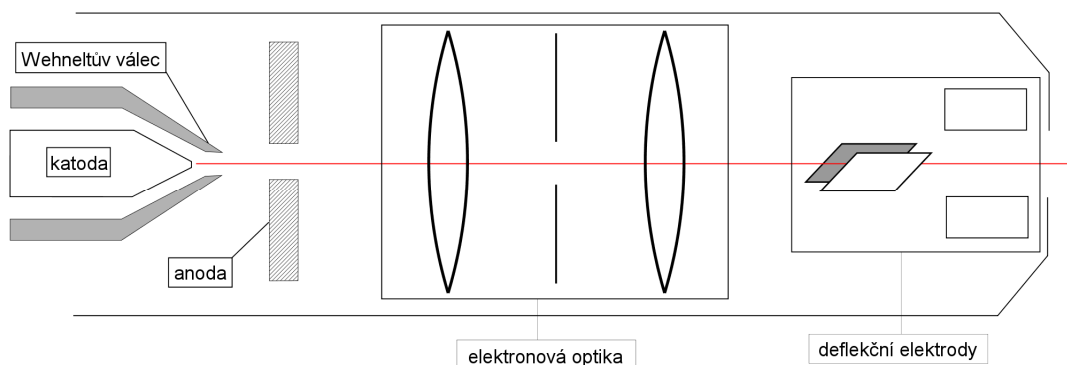
2.3 Důležité součásti aparatury

2.3.1 Elektronové dělo

Jako zdroj svazku elektronů slouží elektronové dělo (electron gun). Elektronové dělo sestává ze tří hlavních částí: zdroje elektronů, elektronové optiky a deflekčních elektrod. Jako zdroj elektronů se používá žhavená katoda, nejčastěji z LaB_6 (obr. 2.3). Elektrony z ní vyletující jsou drženy v jejím okolí tzv. Wehneltovým válcem, což je elektroda obklopující vlákno, na níž je přivedeno malé záporné napětí, které vytváří prostorový náboj v okolí katody a pomocí kterého je tak možné řídit uzavírání a otevírání děla. Za štěrbinou ve Wehneltově válci je umístěna anoda, která svým napětím definuje energii vyletujících elektronů. Následuje elektronová optika (soustava štěrbin a elektrostatických čoček) mající za úkol svazek elektronů zúžit a zaostřit do požadovaného bodu. Energii částic již neovlivňuje. U výstupu z děla jsou umístěny elektrody pro směrování paprsku v rovině kolmé na osu děla (2 pro svislý a 2 pro vodorovný směr umístěné naproti sobě). Schématické znázornění elektronového děla je na obr. 2.4 .



Obr. 2.3: Detail katody elektronového děla (převzato z: http://cryoem.berkeley.edu/~nieder/em_for_dummies/gun.html).



Obr. 2.4: Elektronové dělo – schéma.

2.3.2 Iontové dělo

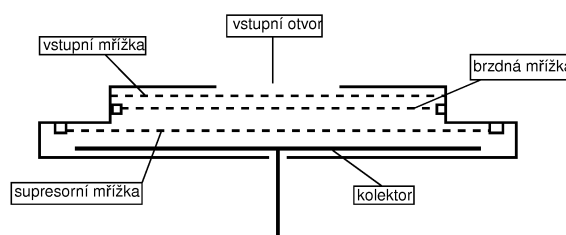
Princip iontového děla je podobný principu elektronového děla, jen jeho provedení je technicky náročnější. Sestává ze zdroje iontů, iontové optiky a deflekčních elektrod pro směřování svazku. Hlavní rozdíl a komplikace oproti elektronovému dělu spočívá v částicích – iontech. Většina iontových děl se používá jako zdroj kladných iontů přičemž ionty mají o 3 až 4 řády větší hmotnost než elektrony, čemuž odpovídá při stejné energii jejich zhruba o 2 řády menší rychlost.

Místo jednoduché žhavené katody používané u většiny elektronových děl se ionty v iontovém děle získávají složitějším způsobem. Využívá se mnoha principů, např. ionizace radiofrekvenčním elektrickým polem, Penningův jev [10], ale nejběžnějším způsobem je ionizace elektrickým svazkem. Do takového iontového děla je tedy zabudováno malé elektronové dělo, kterým se ionizují atomy jejichž ionty chceme použít. Nejčastěji se používají plyny (He, Ar, H₂), které jsou ze zásobníků připouštěny do svazku elektronového děla. Zdaleka ne všechny atomy se ionizují, a proto, aby tyto připouštěné plyny nezhoršovaly vakuum v aparatuře, je iontové dělo s aparaturou propojeno jen velmi úzkým kanálkem, kterým vyletují urychlené ionty. Iontový zdroj má obvykle ještě diferenciální čerpání, které odčerpává část přebytečných plynů. Získané ionty jsou pak dále urychlovány (katodou), iontovou optikou fokusovány a směřovány (obdobně jako u elektronového děla).

2.3.3 Faradayův válec

Faradayův válec je ve své podstatě velmi jednoduché zařízení na měření velikosti elektrického proudu tvořeného svazkem nabitých částic, zároveň však představuje téměř jedinou možnost jak tento proud měřit. Ve své nejjednodušší podobě se může sestávat jen z kovové destičky tzv. kolektoru (obr. 2.5). Pro zpřesnění měření se před kolektor umísťuje tzv. hradící mřížka. Je to tenká kovová mřížka, na kterou se

přivádí záporné napětí kolem -50 V mající za účel vrátit sekundární elektrony vyražené dopadajícími částicemi zpět na kolektor. Snižuje se tak ovlivňování měřeného proudu vlivem sekundární emise z kolektoru.



Obr. 2.5: Faradayův válec – schéma.

V některých aplikacích se mů-

žeme setkat s kolektorem ve tvaru válce, který se na konci kónicky zužuje, kde sice sekundární elektrony mohou vznikat, ale vlivem geometrie jich většina zase dopadne zpět na kolektor. Aby elektrické pole nepronikalo ven z válce a neovlivňovalo okolní prostředí a měřený svazek částic, dává se na vstup do válce před hradicí mřížku ještě jedna, uzemněná, mřížka.

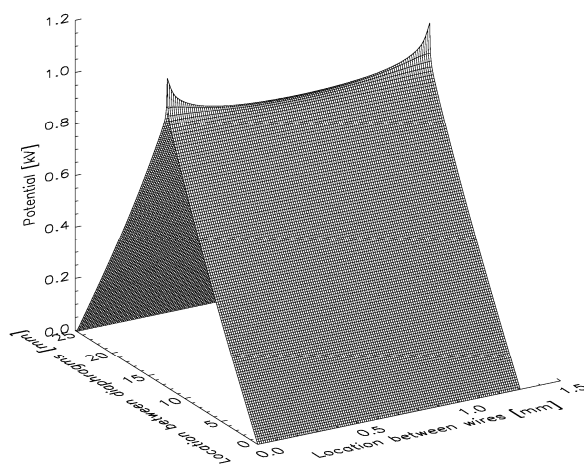
Takovýto Faradayův válec by mohl ovšem měřit jen celkový elektrický proud dopadajících částic (tedy součet kladných a záporných částic v dopadajícím svazku, s tím, že u záporných částic by byla energie omezená napětím na hradicí mřížce), ale v mnoha případech je potřeba rozlišovat kladný a záporný proud, popřípadě měřit proud částic s energií vyšší než nějaká námi zvolená (například měřit energetický profil svazku). Pro tento účel se dává mezi vstupní a hradicí mřížku ještě jedna mřížka (ve zvláštních případech pro větší citlivost i více). Na tuto mřížku přivádíme napětí, jehož polarita závisí na tom, jaké částice chceme měřit. Například, přivedeme-li na prostřední mřížku záporné napětí -500 V, budeme měřit proud kladných částic ve svazku a proud záporných částic, jež měly energii větší než 500 eV. Chceme-li měřit jen záporné částice s energií nad 500 eV, přidáme ještě dvě mřížky, na nejbližší mřížku ke vstupní přivedeme kladné napětí, čímž ze svazku vybereme jen záporné částice (kladné napětí musí mít dostatečnou velikost, aby nepropustilo ani ty nejenergetičtější kladné částice, které ve svazku předpokládáme – v laboratorních podmínkách, kde nepředpokládáme příliš energetické ionty postačí řádově několik málo voltů pro odstínění případných iontů vzniklých ionizací zbytkové atmosféry v aparatuře). Za tuto mřížku umístíme jednu uzemněnou (aby se vzájemně neovlivňovala pole jednotlivých mřížek) a za ní další zápornou mřížku, která vybere jen záporné částice s námi požadovanými energiemi (tj. $U = -500$ V).

Takto navržený Faradayův válec představuje poměrně uzavřený systém, ve kterém lze očekávat vakuum horší než ve zbytku aparatury. Měření může být tedy ovlivněno případnou ionizací uvnitř válce. Také přítomnost mřížek značně ovlivňuje měření,

protože jejich drátky mají nenulový průměr. Analyzované částice mohou do mřížek narážet a být tak odváděny ze svazku (projeví se to jako proud tekoucí mřížkami). Na druhou stranu mohou tyto částice svým nárazem způsobovat sekundární emisi elektronů, které mohou vytvářet prostorový náboj uvnitř válce (a ovlivňovat tak měřené částice), případně samy dopadat na kolektor (a způsobovat nechtěný proud). Z tohoto důvodu je snaha, aby měly mřížky pokud možno co největší světlost (tenké drátky, daleko od sebe). Při některých typech měření (například při měření energetického profilu svazku) je přítomnost mřížek nutná, protože na ně přivádíme napětí, kterým vybíráme energii měřených částic. Přivedeme-li na mřížku určité napětí, obvykle předpokládáme, že mřížka je ekvipotenciální plocha a dané napětí bude stejné ve všech bodech. Ve skutečnosti se projeví konečné rozměry mřížky a přivedené napětí bude jen na drátcích tvořících mřížku, zatímco směrem do středu oka bude potenciál klesat (obr. 2.6). Podrobněji je tento jev diskutován např. v [11]. Důsledek toho efektu je takový, že máme-li

např. svazek elektronů o energii 1000 eV, neměli bychom měřit proud na kolektoru již od napětí na prostřední mřížce -1000 V. Toto napětí bude ale jen na drátcích tvořících mřížku, samotná oka budou dále otevřená a elektrony budou procházet v téměř původním množství. S dalším zvyšováním napětí na mřížce se budou oka postupně

uzavírat a bude procházet stále méně elektronů až při určitém napětí závislém na rozměrech mřížky se oka úplně uzavřou (potenciál -1000 V bude i uprostřed) a na kolektor nebudou dopadat již žádné elektrony. Vlivem měřicí metody tak dojde k drobnému posunutí a „rozmazání“ měřeného energetického spektra. Omezení tohoto jevu si zase vyžaduje co nejhustší mřížku. Při konstrukci mřížky je tedy nutné nalézt vhodný kompromis mezi oběma výše diskutovanými jevy.



Obr. 2.6: Ilustrace pole mezi drátky mřížky s nulovým průměrem při jejich vzdálenosti 1,3 mm (převzato z [11]).

Kapitola 3

Cíl práce

Elektronové dělo, poskytující monoenergetický svazek primárních elektronů má emisní proud regulovatelný v rozsahu 0 – 200 μA . Měření nabíjecích charakteristik prachových zrn ukázala, že vnitřní stabilizace není dostatečná pro naše dynamická měření a různá intenzita nabíjecího proudu pro různé energie zavádí do měření nepřesnosti. Obdobný jev se vyskytuje též u iontového děla. Cílem předkládané práce je návrh dodatečné stabilizace. Hlavním úkolem tedy bylo sestavení a ověření funkce stabilizačního obvodu, který má zajistit konstantní emisní proud pro všechny energie emitovaných částic. Součástí práce bylo i studium některých efektů ovlivňujících detekci toku nabitých částic ve Faradayově válci.

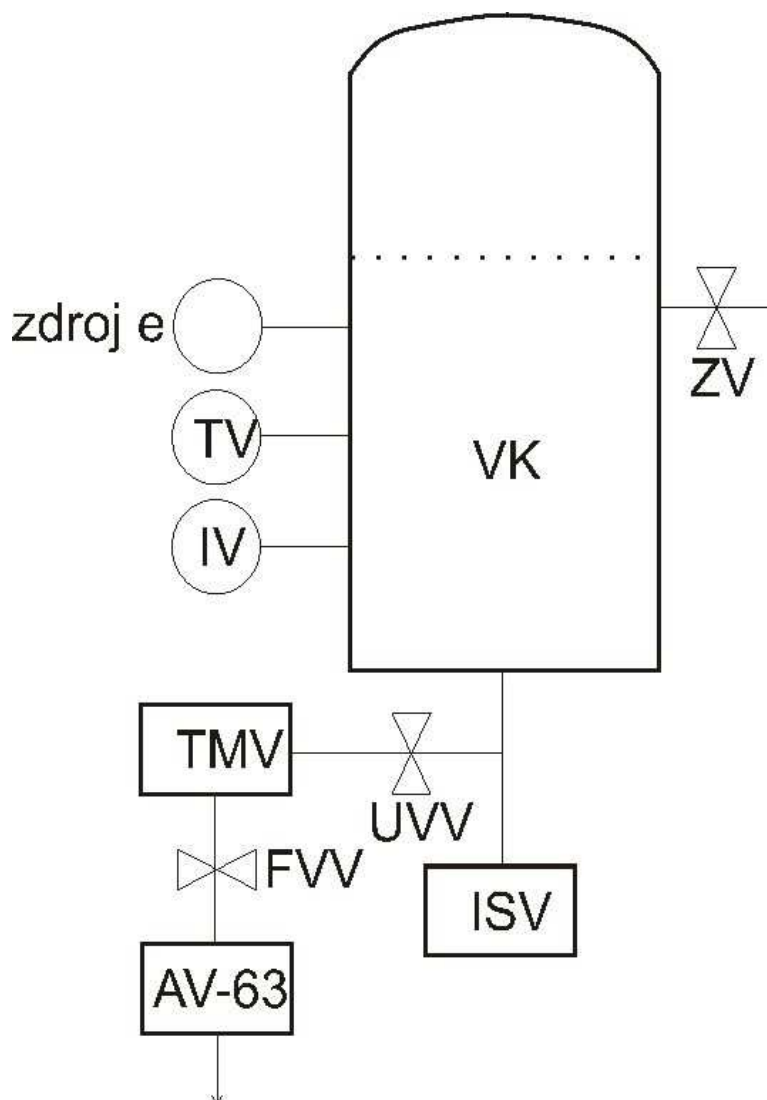
Kapitola 4

Experimentální uspořádání měření

V následující kapitole se blíže seznámíme s konkrétní experimentální aparaturou použitou při měřeních. Jejími nejdůležitějšími součástmi jsou vakuový systém, elektronové dělo a Faradayův válec. Na fotografii na obr. 4.5 v závěru kapitoly uvidíme celou aparaturu po sestavení.

4.1 Vakuový systém

Vakuový systém, na kterém jsem prováděl měření, byl stejný jako při řešení projektu [12]. Byla používána starší aparatura postavená pro kalibraci detektorů nabitých částic pro družicové experimenty. Její principiální schéma je na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Schéma vakuového systému (převzato z [12]).

Srdcem vakuového systému je vakuová komora o objemu přibližně 50 l. Je čerpána dvoustupňově, jako primární stupeň slouží rotační vývěva komerčního systému AV-63, jako sekundární vývěvy slouží turbomolekulární (TMV) s čerpací rychlostí 150 l/s a iontově-sorpční (ISV) s čerpací rychlostí 120 l/s. K měření tlaku ve vakuové komoře slouží termočlánekový (TV) a ionizační (IV) vakuometr. Během experimentů se tlak v aparatuře pohyboval kolem hodnoty $5 \cdot 10^{-6}$ Pa.

4.2 Elektronové dělo

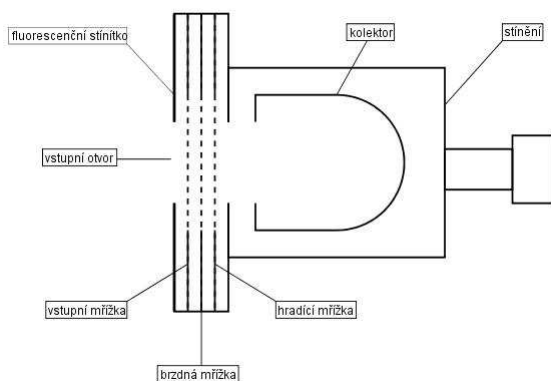
Experimenty jsem prováděl s komerčně vyráběným elektronovým dělem EQ 22/35 firmy SPECS GmbH. Toto dělo je, dle údajů výrobce, schopné dodávat svazek elektronů s energiemi v rozptěti 20 eV – 5 keV a energetickou šířkou menší než 1 eV. Maximální elektrický proud svazku je 200 μ A.



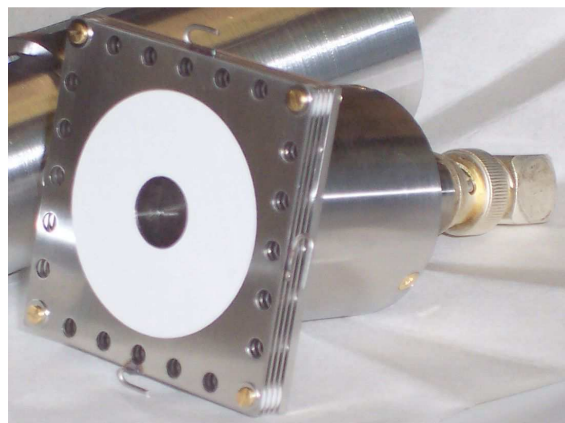
Obr. 4.2: Elektronové dělo EQ 22/35

4.3 Faradayův válec

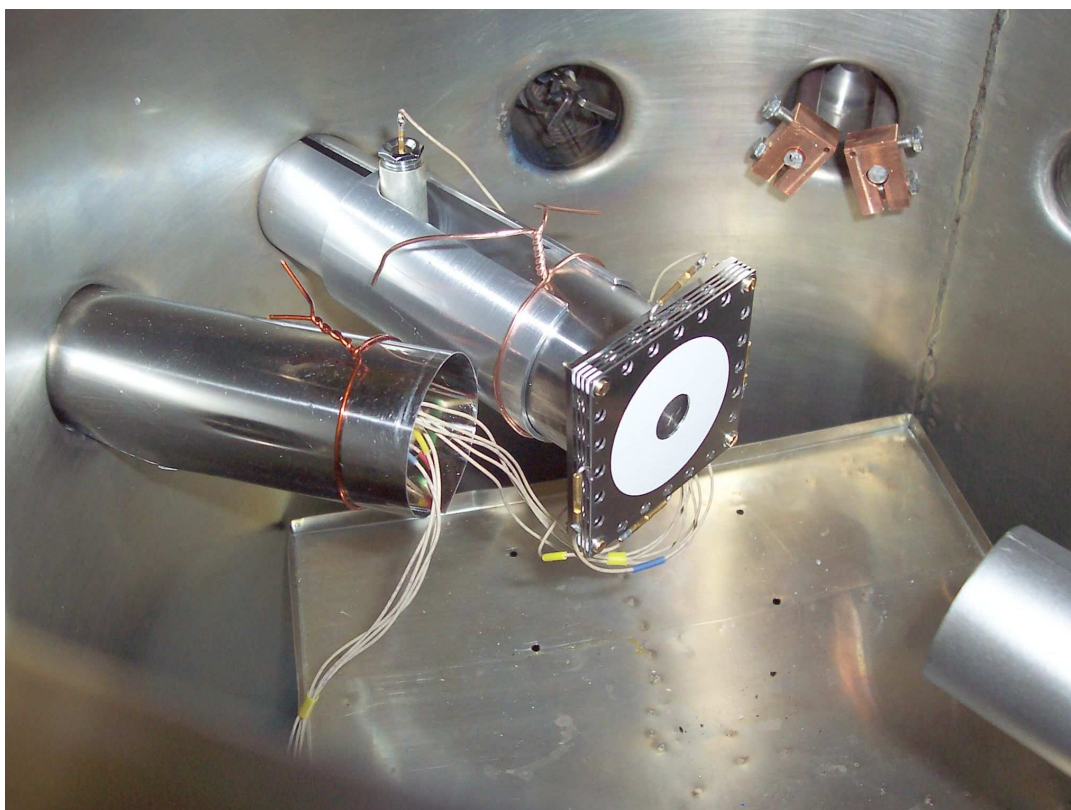
Měření bylo prováděno s komerčně vyráběným Faradayovým válcem FC-72A firmy KIMBALL PHYSICS INC. Tento Faradayův válec má válcový kolektor, 3 mřížky a fluorescenční stínítko obklopující vstupní otvor, takže je možné v případě špatného zaostření nebo nasměrování elektronového svazku pozorovat jeho stopu vizuálně. Schematický náčrt válce je na obr. 4.3 a na obr. 4.4 je potom jeho fotografie.



Obr. 4.3: Faradayův válec – schéma.



Obr. 4.4: Faradayův válec – fotografie.

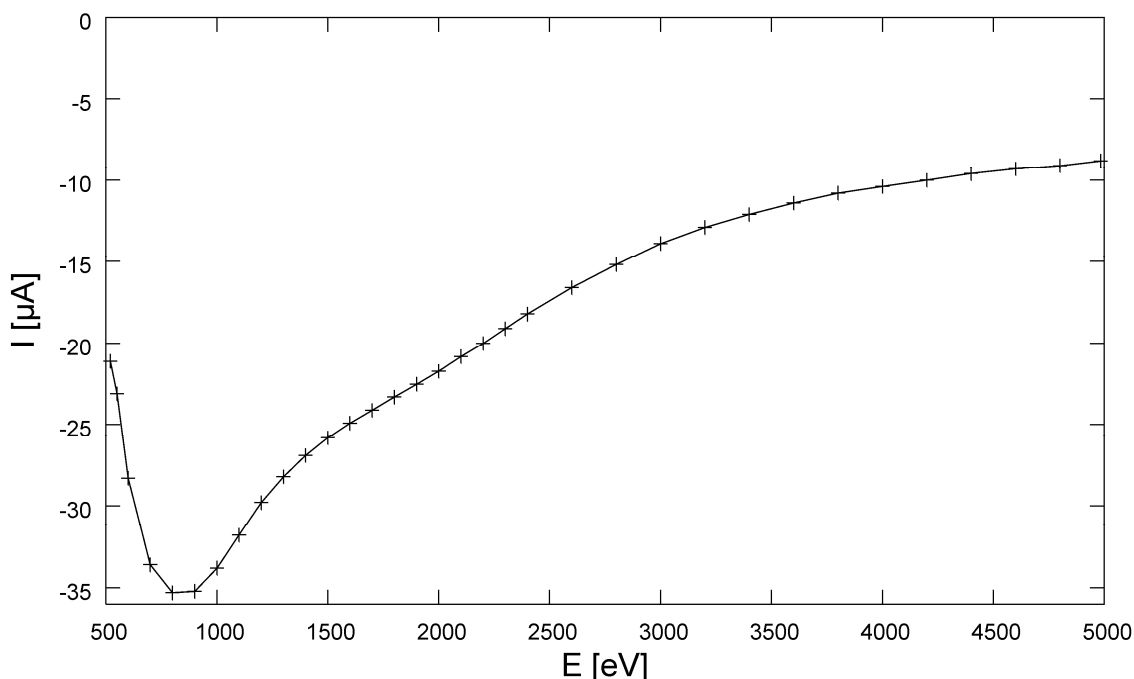


Obr. 4.5: Sestavená aparatura – nalevo Faradayův válec, napravo ústí elektronového děla.

Kapitola 5

Výsledky a jejich diskuze

Hlavním důvodem pro zadání předkládané bakalářské práce (viz. kapitola 3) je závislost proudu děla na energii elektronů ve svazku vynesena do grafu na obr.5.1.



Obr. 5.1: Závislost proudu děla na energii elektronů měřená na kolektoru, na všech mřížkách je nulové napětí.

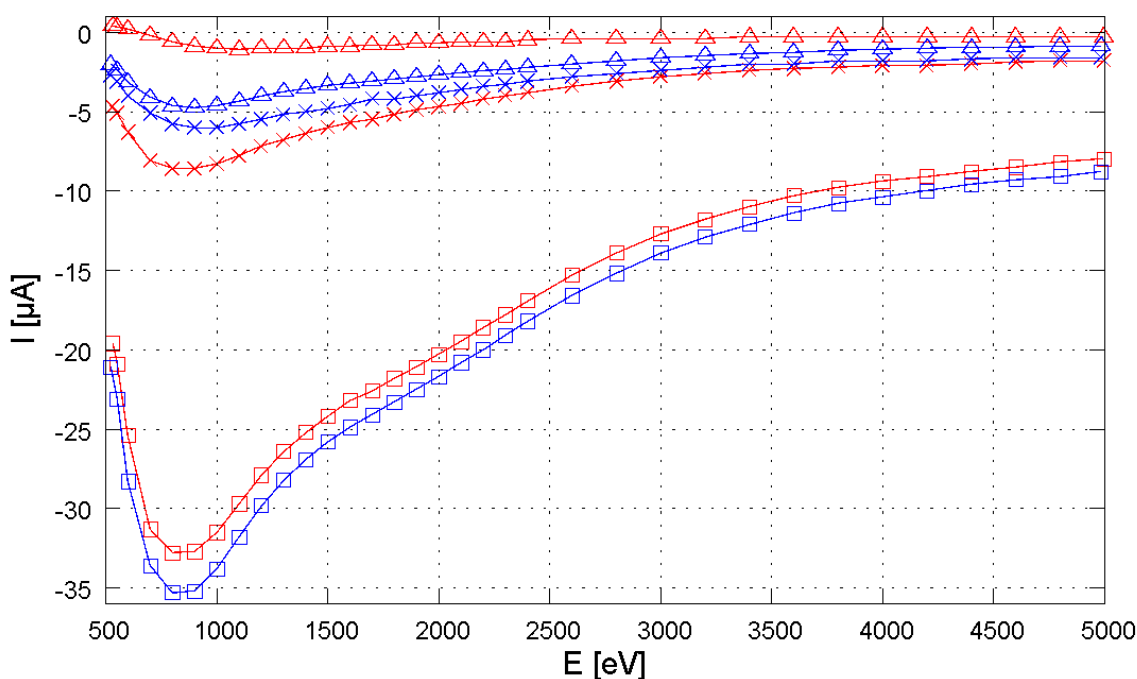
Dříve než přejdeme k samotné stabilizaci, pokusíme se na základě měřených výsledků identifikovat jednotlivé vlivy působící na měření.

5.1 Měření Faradayovým válcem

5.1.1 Vliv hradící mřížky

Vzhledem ke tvaru kolektoru použitého Faradayova válce je možné očekávat jen malé zvýšení kolektorového proudu po přivedení napětí na hradící mřížku (předpokládáme jen malé množství sekundárních elektronů, které mohou opustit kolektor a je potřeba je vrátit zpět). Z grafu na obr. 5.2, který zobrazuje vliv napětí na hradící mřížce na velikost proudu děla, je ale patrný opačný efekt. Po přiložení záporného napětí -43 V na hradící mřížku došlo ke zmenšení kolektorového proudu, zároveň došlo k výraznému snížení proudu tekoucího hradící mřížkou a zvýšení proudu přes vstupní mřížku (zvýšil se i proud prostřední mřížkou, ale kvůli větší přehlednosti není tento proud do grafu vynesena). Tento jev je možné vysvětlit pomocí sekundární

emise přímo z mřížek. Sekundární elektrony mají energii do 50 eV (proto se na hradící mřížku dává napětí kolem 50 V). V případě, že na hradící mřížce není žádné napětí, mohou sekundární elektrony z kolektoru kolektor opouštět (v našem případě vzhledem ke geometrii toto může být zanedbatelné), ale zároveň sekundární elektrony z mřížek mohou dopadat na kolektor a zvyšovat tak měřený proud. Přivedeme-li na hradící mřížku napětí přibližně -50 V, budou sekundární elektrony vraceny na místo svého původu (kolektorové na kolektor, mřížkové k mřížkám) čímž se sníží tok sekundárních elektronů z mřížek na kolektor a zmenší se tak kolektorový proud. Odražené sekundární elektrony se budou vracet zpět k mřížkám, na kterých se mohou zachytit a zvyšovat tak proud prvními mřížkami. Sekundární elektrony vzniklé na hradící mřížce budou od ní odpuzovány (ke kolektoru i k mřížkám v závislosti na tom, na které straně mřížky vznikly), což vysvětluje snížení proudu hradící mřížkou s přiloženým napětím oproti mřížce bez napětí.



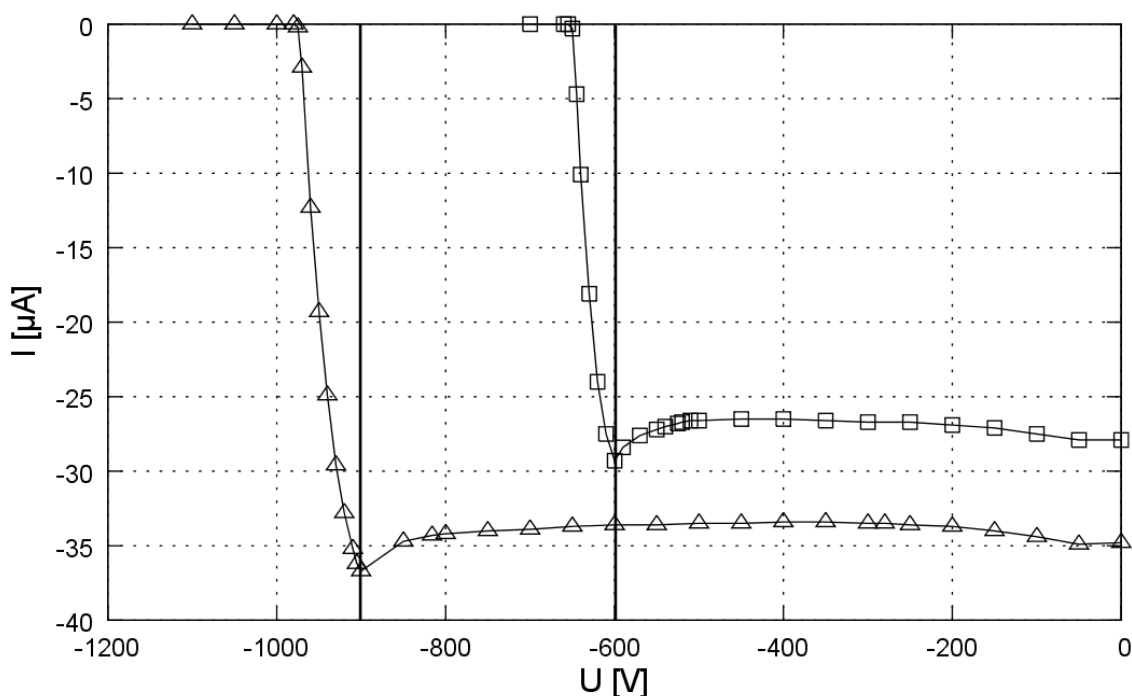
Obr.5.2: Vliv napětí na hradící mřížce na závislost proudu děla na energii elektronů (modře bez napětí, červeně s napětím -43 V, ostatní mřížky 0 V, čtverečky – proud kolektorem, křížky – proud vstupní mřížkou, trojúhelníčky – proud hradící mřížkou).

5.1.2 Vliv pole na mřížce

Vliv pole na mřížce, jak již bylo diskutováno v kapitole 2.3.3, se projeví při proměřování energetického profilu svazku. Máme-li svazek monoenergetických elektronů, nepoklesne kolektorový proud na nulovou hodnotu při napětí na prostřední

mřížce odpovídající energii elektronů, ale až při napětí větším, a zároveň pokles bude pozvolnější. Tento efekt je vidět z grafů na obr. 5.3, které znázorňují proud kolektorem při energiích elektronového svazku 600 a 900 eV. Svislá čára označuje napětí, při kterém měl kolektorový proud prudce poklesnout na nulovou hodnotu. To, že se tak stalo až pro vyšší napětí a pozvolněji, je způsobeno výše diskutovaným jevem.

Část elektrického proudu kolektoru je pravděpodobně kompenzována ionty vznikajícími ve Faradayově válci. Iontová složka pak působí prohnutí brzdné charakteristiky v oblasti napětí menších než je energie svazku. Tento efekt je diskutován dále.



Obr.5.3: Vliv pole na mřížce na měření energetického profilu svazku (čtverečky – 600 eV svazek, trojúhelníčky – 900 eV svazek, na vodorovné ose – napětí na brzdě mřížce, napětí na ostatních mřížkách 0 V).

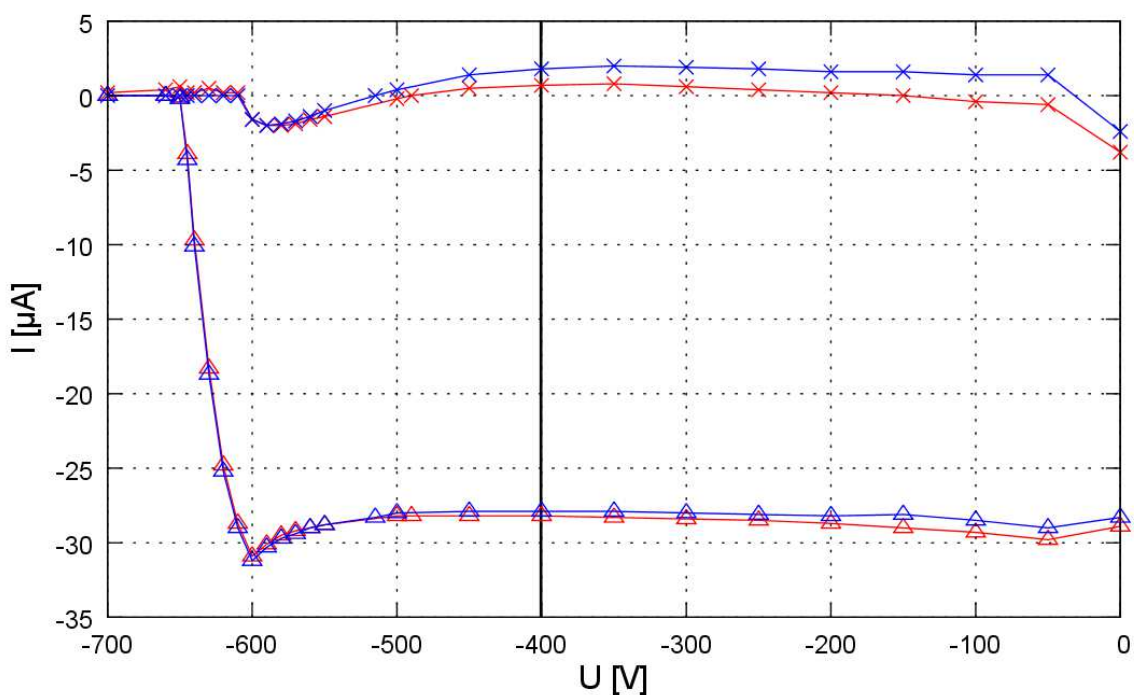
5.1.3 Vliv ionizace

Elektrony (v obecném případě měřené částice) mohou narážet do molekul zbytkových plynů (ať již v aparatuře cestou k Faradayově válci či přímo uvnitř válce) a mohou je ionizovat. Vznikají tak elektrony a ionty schopné dále ovlivňovat měření.

Jednou možností, kde tento jev pozorovat, je při měření energetického profilu svazku. Na prostřední mřížku se přikládá záporné napětí, čímž tato mřížka přitahuje kladné částice ze svého okolí. Je tedy možné očekávat, že proud touto mřížkou bude kladnější než v případě bez napětí. Největší účinný průřez pro ionizaci je kolem energie částic 200 eV (tato hranice je na obr.5.4, kde je zobrazen vliv ionizace na

měřením Faradayovým válcem, označena svislou čarou). Počet vzniklých iontů bude tedy v okolí této energie největší a tudíž je i proud touto mřížkou nejkladnější (vzhledem ke svému napětí přitáhne většinu vzniklých iontů z okolí). Při energii svazku 600 eV budou mít elektrony energii 200 eV u prostřední mřížky, bude-li na ní napětí -400 V. Kladný proud může být dále zvětšován sekundární emisí z mřížky, kdy vzniklé elektrony jsou od mřížky odpuzovány. Při dalším zvětšování napětí na prostřední mřížce klesá účinný průřez ionizace, vzniká méně iontů a klesá tak proud mřížkou. Také elektrony přicházejí k mřížce s menší energií a roste tak pravděpodobnost jejich záchytu. Tím je možné vysvětlit pokles proudu do záporných hodnot v okolí napětí -600 V. Následující pokles elektronového proudu je způsoben tím, že se již žádné částice k mřížce nedostávají.

Z obrázku 5.4 je dále patrné, že zhoršení tlaku na hodnotu řádově 10^{-5} Pa (tj. přibližně o řád) podstatně více ovlivňuje proud brzdou mřížkou než proud kolektorem. Tento vliv je však malý a patrný především pro nízká napětí na brzdě mřížce.



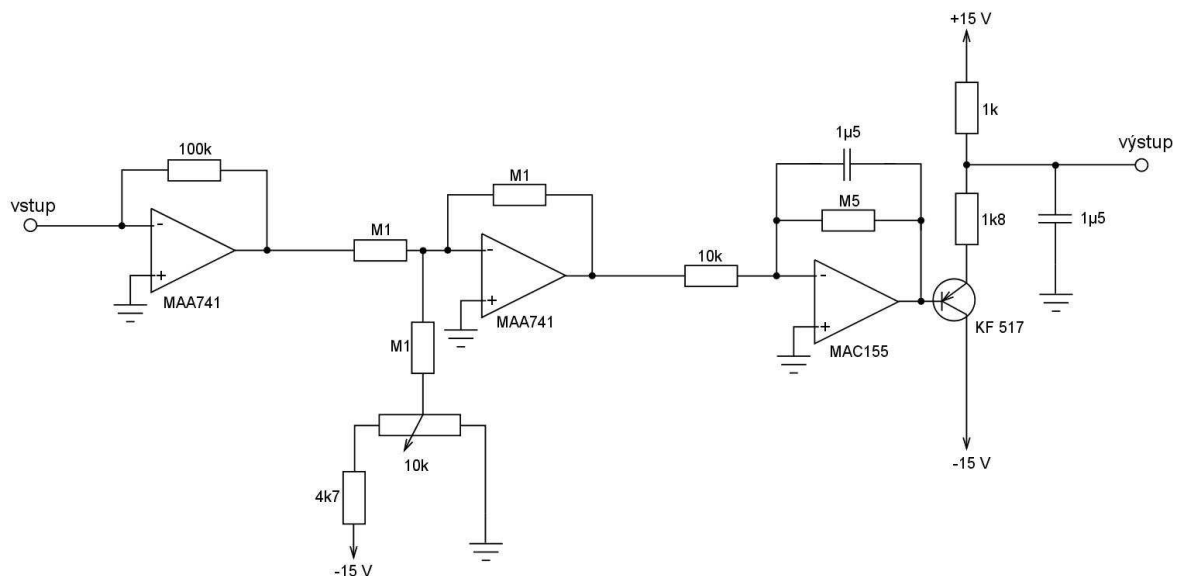
Obr.5.4: Vliv ionizace při měření Faradayovým válcem pro energii svazku 600 eV (modré za běžného tlaku v aparatuře, červené za tlaku o řád horšího, trojúhelníčky – proud kolektorem, křížky – proud brzdící mřížkou, na vodorovné ose – napětí na brzdě mřížce, napětí na ostatních mřížkách 0 V).

5.2 Stabilizace emisního proudu

Z předchozích měření jasně vyplývá, že stabilizace proudu je nutná (velikost proudu silně závisí na energii elektronů a mění se v rozsahu -35 až $-8 \mu\text{A}$). Při stabilizaci byl použit externí vstup elektronového děla pro regulaci proudu výstupního svazku.

5.2.1 Návrh stabilizačního obvodu

Na obr. 5.5 je schéma elektrického obvodu navrženého ke stabilizaci proudu svazku elektronového děla. Skládá se ze čtyř aktivních prvků (3 operační zesilovače a 1 tranzistor). První zesilovač má za úkol převést elektrický proud, jenž je přiváděn přímo z kolektoru Faradayova válce, na napětí, kde 1 V odpovídá vstupnímu proudu $10 \mu\text{A}$. Druhá část slouží jako komparátor a sečte toto napětí s napětím opačné polarity nastaveném na desetiotáčkovém potenciometru - tím nastavujeme požadovanou velikost proudu svazku. Napětí je ve třetí části zesíleno a slouží k ovládání výstupního tranzistoru. Výsledný signál je upraven odporovým děličem do rozsahu zhruba 4–12 V a je dále veden přímo do zdroje elektronového děla, kde ovládá napětí na Wehneltově válci, a tím i proud tekoucí z děla. Vysoká hodnota výstupního napětí přitom odpovídá dělu zavřenému a nízká otevřenému.

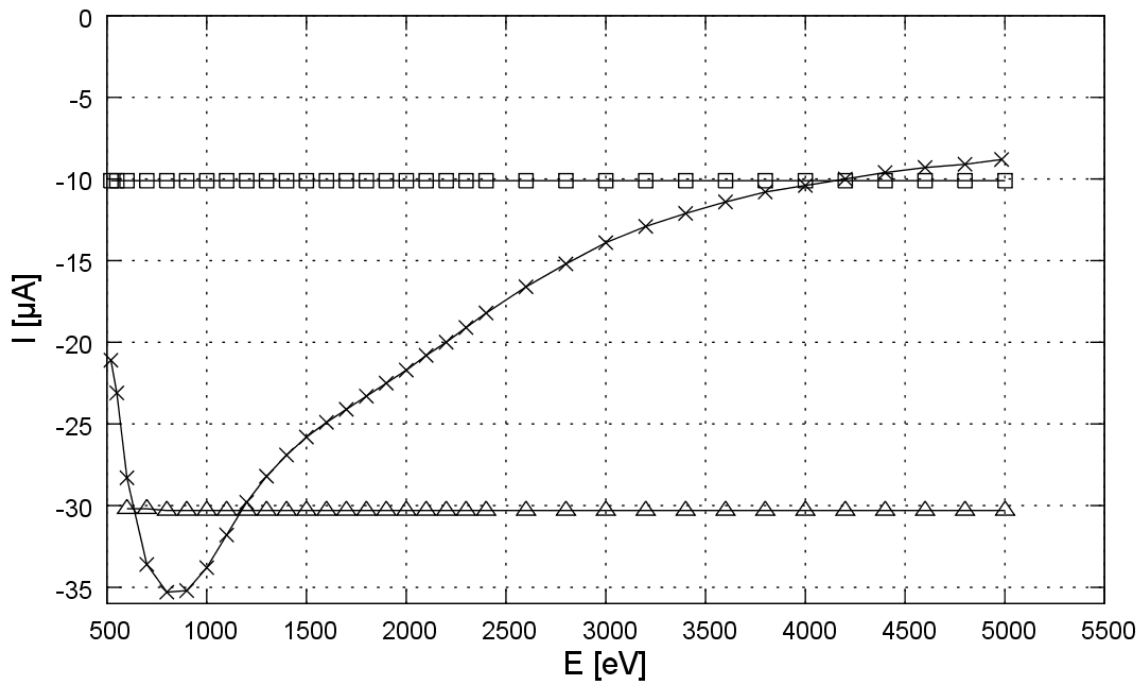


Obr. 5.5: Schéma návrhu stabilizačního obvodu.

5.2.2 Ověření funkce stabilizačního obvodu

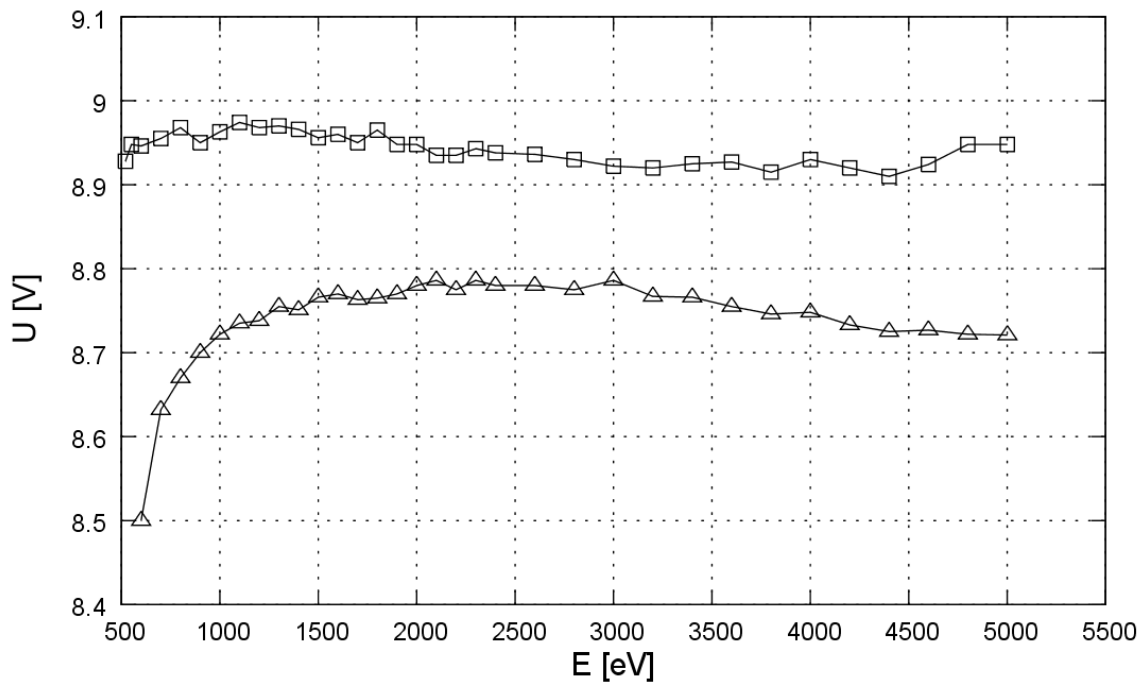
V grafu na obr. 5.6 můžeme porovnat měření proudu kolektorem bez stabilizace a se stabilizací. Měření se stabilizací byla prováděna pro dvě nastavení (hodnoty prou-

du) a je zřejmé, že v daném intervalu energií a při daném nastavení splňuje navržený stabilizační obvod veškeré požadavky na něj kladené.



Obr. 5.6: Ověření funkce stabilizačního obvodu (proud kolektorem: křížky – bez stabilizace, čtverečky – stabilizováno na $-10 \mu\text{A}$, trojúhelníčky – stabilizováno na $-30 \mu\text{A}$, napětí na mřížkách 0 V).

Na obr. 5.7 můžeme sledovat jak stabilizační obvod stabilizuje. Na svislou osu je vynášeno napětí měřené na výstupu ze stabilizačního obvodu (vstupu do zdroje děla). Jak bylo uvedeno v předcházející podkapitole, odpovídá většímu napětí zavřenější dělo (zmenšuje se proud z děla). Tomu odpovídá jednak umístění křivek (čtverečky – stabilizace na menší proud – větší napětí – zavřenější dělo, trojúhelníčky – stabilizace na větší proud – menší napětí – otevřenější dělo) a také jejich tvar (při zvyšování energie svazku se nejprve dělo uzavírá a poté mírně otevírá). Tímto obvodem je možné stabilizovat proud z děla jak vůči závislosti z grafu na obr. 5.1 tak i vůči případným výkyvům způsobeným jinými příčinami (kolísání proudu katodou apod.).



Obr. 5.7: Stabilizační obvod při stabilizaci (napětí na výstupu: čtverečky - stabilizováno na $-10 \mu\text{A}$, trojúhelníčky - stabilizováno na $-30 \mu\text{A}$, napětí na mřížkách 0 V).

Kapitola 6

Shrnutí a závěr

Při měření s Faradayovým válcem byly experimentálně prokázány vlivy, které toto měření ovlivňují. Jedná se zejména o vliv hradící mřížky, vliv pole na mřížkách a vliv ionizace. V případě hradící mřížky se ukázalo, že napětí na hradící mřížce, které má zabránit úniku elektronů z kolektoru, nemění tvar měřených závislostí, ale zmenšuje kolektorový proud tím, že brání sekundárním elektronům z mřížek dopadat na kolektor. Pole na mřížkách ovlivňuje především měření energetických profilů svazků a tento vliv je principiálně neodstranitelný. V případě potřeby velké přesnosti při měření je možné tento vliv korigovat výpočtem na základě znalosti rozměrů mřížek. Při zhoršení tlaku ($z \approx 10^{-6}$ na $\approx 10^{-5}$ Pa) je vliv zvýšené ionizace na kolektorový proud možné zanedbat, tlak může tedy v průběhu experimentů kolísat minimálně v tomto rozmezí aniž by bylo potřeba toto nějak dále zohledňovat.

Pro stabilizaci emisního proudu elektronového děla byl navržen a zkonstruován stabilizační obvod, který byl zároveň vyzkoušen. Prokázalo se, že plně vyhovuje na něj kladeným požadavkům a je vhodný pro zabudování do aparatury. Tento obvod, po zohlednění opačných polarit, je možné použít i pro stabilizaci proudu iontového děla. Ve vztahu k nově budované aparatuře je nutné na tomto úseku ještě splnit v zásadě tři úkoly: ověřit použitelnost navrženého obvodu i pro iontové dělo, sestavit obvod v podobě vhodné pro zabudování do nově budované aparatury a jeho finální zabudování.

Literatura

- [1] Landgraf M. (2005): The Sun's Dust Disk – Discovery Potential of the New Horizons mission during Interplanetary Cruise, arXiv:astro-ph/0502273.
- [2] Kruger H., et al. (2001): Four years of Ulysses dust data: 1996-1999, *PLANET SPACE SCI* **49** (13), 1303 – 1324.
- [3] Fortov V. E., et al. (1998): Dusty plasma induced by solar radiation under microgravitational conditions: An experiment on board the Mir orbiting space station, *JETP* **87** (6), 1087 – 1097.
- [4] Tsou P., et al. (2004): Stardust encounters comet 81P Wild 2 – art. no. E12S01, *J GEOPHYS RES-PLANET* **109** (E12), 1201 – 1201.
- [5] Sternovský Z.: Laboratorní simulace nabíjení kosmických prachových částic, diplomová práce, MFF UK, Praha, 1998.
- [6] Čermák I.: Laboruntersuchung elektrischer Aufladung kleiner Staubteilchen, Inaugural-Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 1994.
- [7] Pavlů J.: Studium elementárních procesů v prachovém plazmatu, diplomová práce, MFF UK, Praha, 2001.
- [8] Žilavý P., Němeček Z., Šafránková J. (1999): Size and density determination of a spherical particle in the dust charging experiment, *Proceedings of Contributed Papers WDS 1999 – part II*, Matfyzpress (Praha), 252 – 257.
- [9] Sickafoose A.A., Colwell J.E., Horányi M., Robertson S.(2001): Experimental investigations on photoelectric and triboelectric charging of dust, *J GEOPHYS RES* **106** (A5), 8343 – 8356.
- [10] Hill C.E. (2001): Ion and electron sources, seminář CAS – CERN Accelerator School, Ženeva, <http://linac2.home.cern.ch/linac2/seminar/seminar.htm>.
- [11] Beránek M., Jelínek K., Koval A.: Modeling of Motion of Charged Particles in the Faraday Cup, WDS' 05 Conference, Prague, June 7–10, 2005.
- [12] Pavlů J.: Návrh a ověření speciálního detektoru pro studium nabíjení prachových částic, studentský projekt, MFF UK, Praha, 1998.