

PPRAK

Elektronové dělo a detekce elektronového svazku

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

15. února 2019

OBSAH

1 Úvod	3
2 Elektronové svazky ve vakuu	4
2.1 Princip vzniku volných elektronů a vedení ve vakuu	4
2.2 Vedení elektrického proudu v plynech	4
2.2.1 Výboj za obvyklého tlaku	5
2.2.2 Výboj za sníženého tlaku	6
3 Elektronové dělo	7
3.1 Běžné architektury elektronových děl	7
3.2 Architektura použitého elektronového děla	9
4 Set-up elektronového děla	11
4.1 Návrh experimentu	11
4.2 Postup	11
5 Detekce	14
5.1 Detekční technologie	14
5.2 Principy detekce polovodiči	14
5.3 Pixelové detektory	14
5.4 X-CHIP03	15
6 Set-up detektoru	17
7 Fokusace	19
8 Výsledky a diskuze	22

1 ÚVOD

Za úkol na předmětu Projektové Praktikum bylo zadáno navrhnout a následně sestrojít 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.

Celkem dvě skupiny byly rozděleny tak, že první skupina se zabývala urychlující částí, tj. návrhem a sestavením elektronového děla a zdroje vysokého napětí, druhá skupina měla na starosti doplňující fokusující soustavu a detektor intenzity elektronového svazku.

V zimním semestru byla navržena celková soustava experimentu, a také provedena částečná realizace experimentu ve vakuové komoře, nezahrnující doplňující soustavu fokusující svazek a detektor.

V následující kapitole je představeno chování elektronů ve vakuu a jevů s ním spojeným jako jsou výboje. Třetí kapitola se zabývá elektronovým dělem, zejména jeho architekturou a porovnáním s běžnými architekturami. Čtvrtá kapitola je zaměřena na samotnou realizaci zapojení elektronového děla a celkovým set-up experimentu. Pátá kapitola se věnuje zvolenému křemíkovému pixelového detektoru X-CHIP03, jehož zapojení a vyčítání je popsáno v další kapitole. V sedmé kapitole jsou představeny možnosti doplňující fokusace a jejich simulace pomocí programu SIMON. V poslední kapitole jsou pak diskutovány výsledky z prvních testů elektronového děla, které byly naměřeny na konci zimního semestru.

2 ELEKTRONOVÉ SVAZKY VE VAKUU

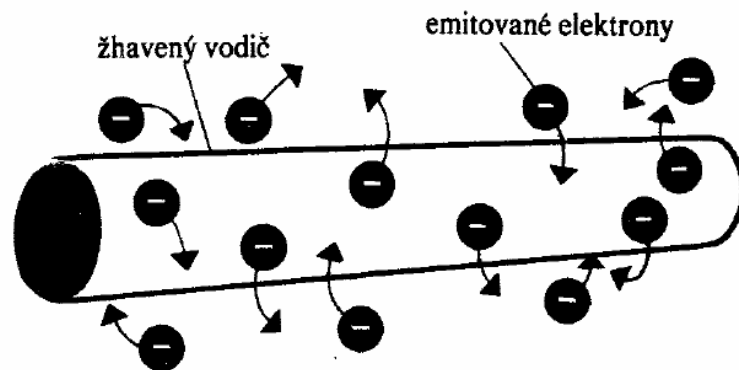
Jelikož vakuum neobsahuje nabité částice, elektrickým proud jím standardně neprochází. Průchod elektrického proudu je podmíněn vznikem nosičů náboje na elektrodách, konkrétně uvolněním elektronů z katody.

Výhody toku elektronů ve vakuu spočívají v několika vlastnostech, které elektrony mají. Především mají elektrony velmi nízkou hmotnost, tudíž mají i největší měrný náboj a vysokou rychlost i ve slabých magnetických a elektrických polích. Dále pak u nich přenos náboje není spojen z přenosem látky, což může být velmi výhodné. Zároveň je lze získat poměrně snadno uvolňováním z kovů.

2.1 PRINCIP VZNIKU VOLNÝCH ELEKTRONŮ A VEDENÍ VE VAKUU

V kovovém vodiči se obvykle neuspořádaně pohybují volné elektrony. Při zahřátí vodiče na dostatečně vysokou teplotu tyto elektrony získají dostatečnou energii na to, aby vyletěly z vodiče do prostoru. Tento princip vzniku se nazývá termoemise.

Během tohoto procesu se ovšem původně neutrální vodič stává kladně nabitým a většina emitovaných elektronů je pak přitahována zpátky na povrch vodiče za vzniku tzv. elektronového mraku (Obr. 2.1).



Obrázek 2.1: Elektronový mrak, převzato z [1].

2.2 VEDENÍ ELEKTRICKÉHO PROUDU V PLYNECH

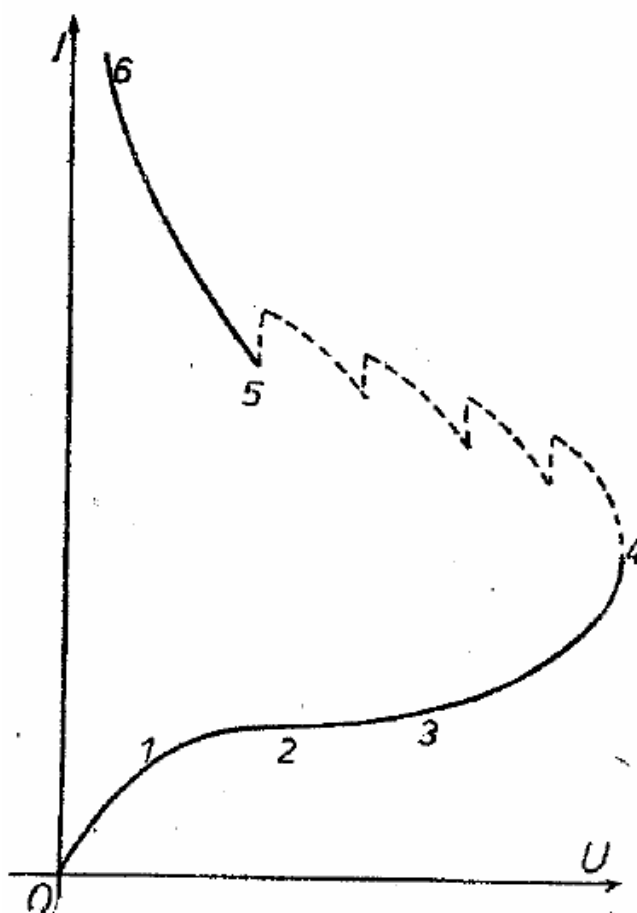
Jelikož v naší komoře může být problém s odčerpáním vzduchu, je nutné popsat také chování elektronové svazky v plynech.

Plyn je za normálních podmínek izolant, který se stává vodivým až v případě, že obsahuje volné částice s nábojem a je ve vnějším elektrickém poli. Aby se plyn mohl stát vodivým, je

nutné jej ionizovat dodáním energie, díky které se molekuly plynu rozštěpí na elektrony a kladné ionty. Současně dochází v plynu také k opačnému ději, který se nazývá rekombinace. Pokud ionizace převyšuje rekombinaci, zvyšuje se vodivost plynu. Pokud se plyn nachází v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami, dochází k pohybu kationtů ke katodě a aniontů k anodě. Tímto pohybem vzniká v plynu elektrický proud. Tento děj se nazývá výboj.

2.2.1 VÝBOJ ZA OBVYKLÉHO TLAKU

Za normálního tlaku je nutné mít velkou intenzitu elektrického pole (asi 10^6 V/m), aby vznikla ionizace. Závislost výboje na napětí je vykreslena na Obr. 2.2. V části 3-4 vzniká tichý výboj, 4-5 jiskrový výboj a v úseku 5-6 obloukový výboj.



Obrázek 2.2: Závislost výboje na napětí, převzato z [1].

Tichý výboj vzniká zvláště v oblasti s malým poloměrem křivosti a je doprovázen světélkováním plynu a šelestem na elektrodách. Jiskrový výboj vzniká přechodem většího náboje při vysokém napětí, kdy dochází k průrazu plynu. Obloukový výboj vzniká po krátkém do-

tyku obou elektrod a následném mírném oddálení. Jednotlivé výboje jsou zachyceny na obrázcích Obr. 2.3-2.5.



Obrázek 2.3: Fotografie tichých výbojů na sloupu a elektrickém vedení, převzato z [1].



Obrázek 2.4: Fotografie blesku - jiskrového výboje, převzato z [2].



Obrázek 2.5: Fotografie obloukového výboje, převzato z [1].

2.2.2 VÝBOJ ZA SNÍŽENÉHO TLAKU

Za sníženého tlaku dochází k výboji při mnohem nižším napětí, jelikož ionty mají větší volnou dráhu. Výboj ve zředěném plynu nazýváme doutnavý. Pokud z trubice čerpáme vzduch, je možné vidět vlnící se červený pruh, který vychází z anody. Při dalším zředování se barevný sloupec rozširuje a zkracuje, katodu pak pokrývá doutnavé katodové světlo. Při velmi nízkém tlaku pak světlo v trubici vybledne a objevuje se fluorescence na stěnách trubice.

3 ELEKTRONOVÉ DĚLO

Pro generování svazku elektronů jsme se rozhodli použít elektronové dělo z CRT monitoru, tato děla mohou urychlovat elektrony až na energie pár desítek kiloelektronvoltů. Dostupné byla dvě elektronová děla, první nejspíše z jednobarevného osciloskopu a druhé z barevného monitoru se třemi paralelními kanály. Technicky jednoduší i z pohledu zapojení se nám jevílo jedno kanálové dělo z osciloskopu, viz Obr. 3.1. Protože jsme nenašli nákresy tohoto elektronového děla, tak jsme funkce jednotlivých částí děla a napětí na ně přivedené museli odvodit srovnáním s dostupnou literaturou.



Obrázek 3.1: Elektronové dělo z osciloskopu s jedním urychlovacím kanálem.

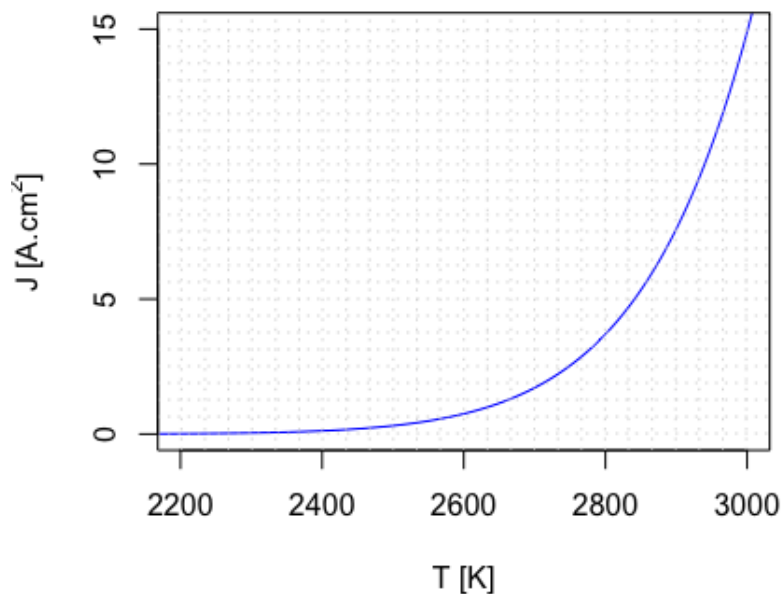
3.1 BĚŽNÉ ARCHITEKTURY ELEKTRONOVÝCH DĚL

Jako zdroj volných elektronů se využívá nažhaveného wolframové vlákna ve vakuu, kdy dochází k termoemisi elektronů do prostoru. To se děje v důsledku dostatečné tepelné energie srovnatelné s výstupní prací elektronů z kovu. Hustota proudu elektronů vylétujících z povrchu vlákna se řídí podle Richardson-Dushmanova zákona:

$$J = BT^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (3.1)$$

kde W je výstupní práce, k Boltzmanova konstanta, T termodynamická teplota a B charakteristická konstanta pro každý kov. Křivka na Obr. 3.2 poukazuje na potřebu zahřát Wolframové vlákno alespoň na teplotu nad 2300 K, což by mělo být splněno, díky Ohmickému ohřevu při napětí okolo 10 V.

Nejčastěji je wolframové vlákno obklopeno Wehneltovým válcem se záporným napětím, který odpuzuje elektrony ve směru letu. Volbou velikosti napětí je také možné regulovat množství uvolněných elektronů. V jiných nastaveních, jako na Obr. 3.3a, následuje po wolframovém vláknu pouze kontrolní mřížka se záporným napětím. Přes tuto potenciálovou bariéru dokážou elektrony proniknout k předurychlovací anodě, ale v závislosti

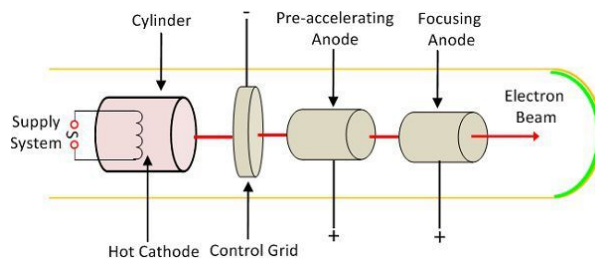


Obrázek 3.2: Elektronový proud z povrchu wolframu J v závislosti na teplotě T . Parametry pro wolfram v rovnici (3.1) jsou $W = 4,54$ eV a $B = 60$ Acm²K² [3].

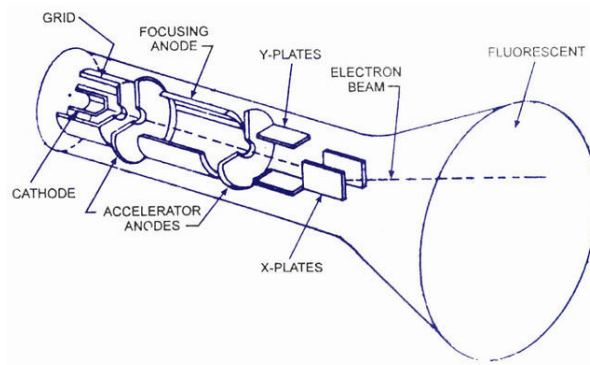
na napětí pouze úměrná část z počtu. V monitoru slouží kontrolní mřížka k ovládní jasu, při použití např. v elektronkových zesilovačích funguje jako tzv. “gate”. Velikost záporného napětí přivedené na Wehneltův válec či kontrolní mřížku je v řádu desítek voltů.

Běžně již následuje předakcelerační anoda A_1 , fokusační anoda F a hlavní akcelerační anoda A_2 , toto nastavení lze vidět na Obr. 3.3b. Jelikož na jednotlivých anodách je potenciál oproti zemi nastaven následovně $\varphi_F < \varphi_{A_1} < \varphi_{A_2}$, slouží fokusační anoda efektivně jako katoda, protože pokud by nebyla přítomna, tak by byl potenciál podél dráhy elektronů větší. Tím shlukuje svazek v průřezu. V technicky vyspělejších elektronových dělech se kombinují anody s různými potenciály právě tak, aby svazek byl fokusován. Typické hodnoty napětí a architektura elektrod je na Obr. 3.3c. Obecně potenciál na urychlovacích anodách roste ve směru letu elektronů od několika až po desítky kilovoltů. Fokusační anody mají potenciál od stovek voltů do jednotek kilovoltů. Můžeme se setkat i s elektronovými děli se soustavou nad osm elektrod.

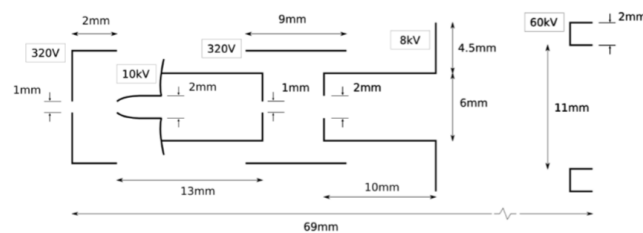
Dále se v CRT monitorech používá elektrostatického vychylování svazku v horizontálním a vertikálním směru kolmém na osu děla pomocí párů vychylovacích desek (Obr. 3.3b). Jiný způsob zejména využívaný v televizorech je elektromagnetické vychylování cívkami, které mohou docílit většího úhlu vychýlení, a to až 110° oproti 30° předešlou metodou.



(a) Schéma elektronového děla. [4]



(b) Katodová trubice. [5]

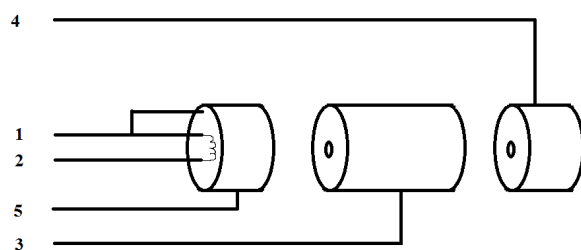


(c) Řez elektronovým dělem. [6]

Obrázek 3.3: Schémata různých realizací elektronového děla.

3.2 ARCHITEKTURA POUŽITÉHO ELEKTRONOVÉHO DĚLA

Sestavili jsme schéma námi používaného děla na Obr. 3.4. Svorky 1 a 2 by měli sloužit jako žhavení wolframového vlákna, kde na svorku 1 je přivedeno záporné napětí, které je dále svedeno nejspíše na Wehneltův válec, či kontrolní mřížku. Domníváme se, že elektrody zapojené jednotlivě ke svorkám 5, 3 a 4 jsou postupně předurychlovací, fokusační a hlavní urychlovací anoda. Je také možné že svorka 5 je Wehneltův válec. Na poslední hlavní urychlovací anodu přivedeme takové napětí, podle toho jakou energii chceme elektronům dodat, samozřejmě s přihlédnutím na možné probíjení mezi elektrodami či jejich svorkami. Nejoptimálnější rozdělení napětí budeme muset určit experimentálně, podle produkce a chování svazku.



Obrázek 3.4: Sestavený návrh námi používaného elektronového děla. Svorky 1 a 2 vedou na žhavení wolframového vlákna. Funkce anod spojených se svorkami 3, 4 a 5 musíme určit.

4 SET-UP ELEKTRONOVÉHO DĚLA

V této kapitole detailně rozebereme, jak jsme experiment navrhli a sestrojili. K dispozici jsme měli elektronové dělo, vakuovou komoru, zdroje vysokého napětí, fluorescenční stínítko, stavebnici Merkur a plastové trubky. Detektor, který použijeme pro určení vlastností elektronového svazku, je momentálně ve fázi výroby a podrobněji o něm pojednávají následující dvě kapitoly.

4.1 NÁVRH EXPERIMENTU

Experiment koncipujeme tak, že pomocí elektronového děla vytvoříme elektronový svazek dostatečně kolimovaný a intenzivní na to, abychom byli schopni detektorem ve vzdálenosti zhruba 20 centimetrů od děla proměřit strukturu svazku. Vzdálenost od děla je dána především omezenými rozměry vakuové komory, ve které je nutné pokus provádět z důvodu udržení stabilního elektronového svazku.

V zimním semestru jsme si dali za cíl provést experiment s fluorescenčním stínítkem místo detektoru - jednak kvůli časové náročnosti vytvoření detektoru, jednak kvůli ověření, že naše elektronové dělo funguje. Jedná se tedy o testovací verzi.

4.2 POSTUP

Nejprve jsme vyřešili konstrukci experimentu a kabelové připojení k vakuové komoře, dále jsme připravili vakuovou komoru a připojili zdroje napětí.

SESTAVENÍ KONSTRUKCE

Abychom ve válcové vakuové komoře mohli pracovat na vodorovné ploše, využili jsme kovový podstavec kompatibilní se stavebnicí Merkur. Na něj jsme připevnili fluorescenční sklíčko uchycené v konstrukci tak, aby drželo svisle, a elektronové dělo směřující na sklíčko. Dělo bylo potřeba zakomponovat do konstrukce takovým způsobem, aby se jí nedotýkalo. K izolaci jsme využili plastovou trubku. Uřízli jsme ji na délku děla, vyvrtali potřebné díry, připevnili ke konstrukci pomocí samovázacích plastových pásků a dělo do ní vložili. Prozatím jsme dělo k trubce nijak neupevňovali. Fluorescenční stínítko má totiž větší plochu než vyvíjený detektor a dělo míří na stínítko i bez upevnění.

KABELOVÉ PŘIPOJENÍ

Po vyřešení konstrukce jsme k dělu vytvořili jednotlivé kabely sloužící k připojení děla k vysokonapěťové průchodce komory. Kabely jsme k dělu připojili pomocí svorkovnic (tzv. "čokolád") a k průchodce pomocí vhodných svorek. Jelikož máme v úmyslu na jednu z elektrod děla přivádět napětí až 80 kV, soustředili jsme se především na izolaci, k níž jsme využili plastovou trubku (Obr. 4.1a).

Podobně jsme vyřešili připojení zdrojů napětí k průchodce vakuové komory a kabel používaný pro vysoké napětí jsme rovněž izolovali plastovou trubkou.



(a) Fotografie elektronového děla s připojenými a zaizolovanými kabely.



(b) Všechny části experimentu jsme důkladně vyčistili lihem pomocí papírových utěrek.

Obrázek 4.1: Po dokončení příprav děla jsme lihem vyčistili aparaturu.

PŘÍPRAVA KOMORY A ZAPOJENÍ ZDROJŮ

Před zkompletováním experimentu jsme v gumových rukavicích vyčistili technickým lihem všechny komponenty vkládané do komory a komoru samotnou, aby nám potenciální nečistoty nesnižovaly kvalitu dosaženého vakua (Obr. 4.1b). Pak jsme již vložili konstrukci do komory, připojili všechny kabely na průchodku a komoru pečlivě uzavřeli (Obr. 4.2). K dosažení žádaných hodnot napětí na elektrodách elektronového děla jsme na prostřední elektrodu zapojili dva zdroje do série k získání stovek voltů, na urychlovací elektrodu jsme připojili zdroj s nejvyšším napětím a k žhavicí elektrodě jsme připojili zdroj s nejnižším napětím. V testovací fázi jsme zkoušeli pouze tyto tři elektrody. Pro případ jakéhokoli selhání izolace nebo výboje jsme vakuovou komoru spojili kabelem s uzemněním jednoho ze zdrojů. Takto sestavený experiment jsme podrobili zkoušce.



Obrázek 4.2: Po vložení děla do komory jsme kontakty připojili na průchodku.

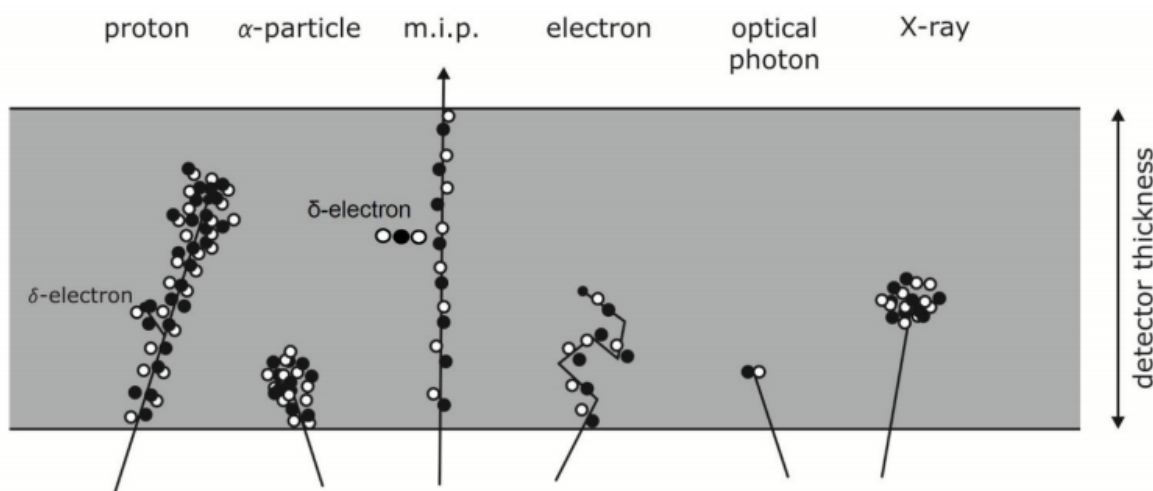
5 DETEKCE

5.1 DETEKČNÍ TECHNOLOGIE

Po zvážení možností způsobu detekce elektronového svazku bylo jako optimální možnost zvoleno použití křemíkového pixelového detektoru X-CHIP03 vyvinutého v rámci FJFI ČVUT v Praze skupinou CAPADS. Ten by by jako detektor ionizujícího záření měl dobře posloužit účelu a velkou výhodou jeho použití je možnost konzultace s týmem, který jej vytvořil.

5.2 PRINCIPY DETEKCE POLOVODIČI

Základním prvkem polovodičového detektoru je tzv. vyprázdněná oblast. Jde o místo s minimální koncentrací volných nosičů náboje, které vznikne v diodě při jejím zapojení v závěrném směru. Prolétající ionizující částice předávají energii vázaným elektronům, které přejdou do vodivostního pásu. Tím vznikají podél trajektorie primární částice elektron-děrové páry (viz Obrázek 5.1), které v elektrickém poli driftují ke sběrným elektrodám.

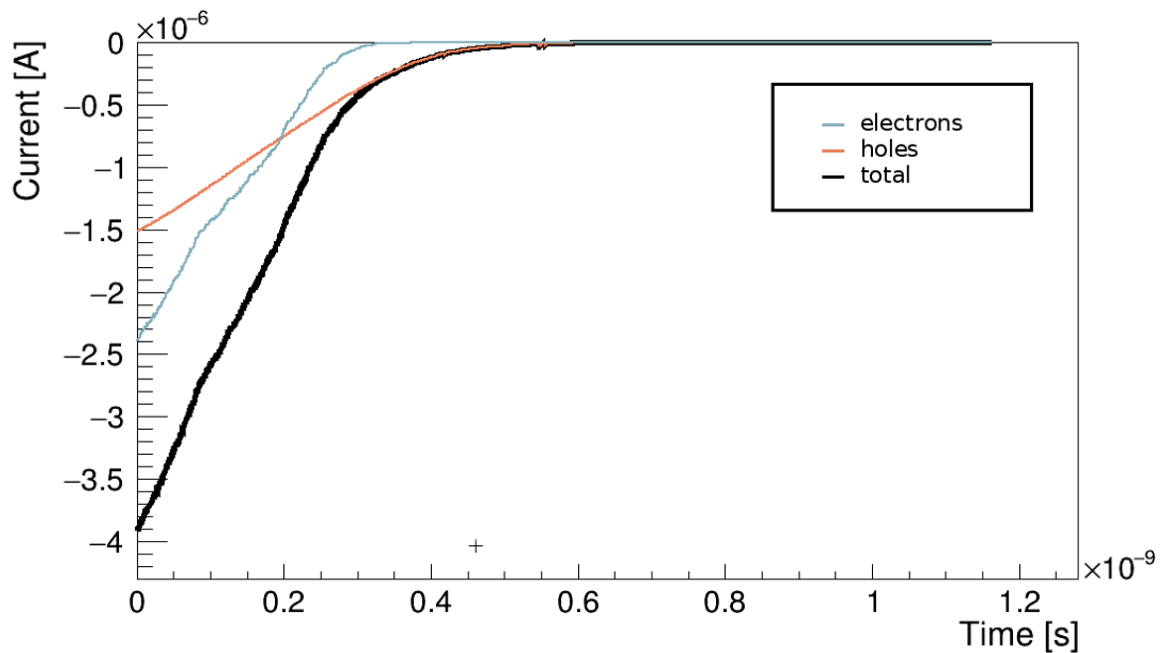


Obrázek 5.1: Znázornění elektron-děrových párů vzniklých ve vyprázdněné oblasti detektoru při průletu různých druhů ionizujících částic.

Driftem elektronů a děr vzniká v materiálu proud, který je následně registrován jako signál. Jeho časový vývoj závisí například na typu nosiče (elektrony se pohybují $\sim 3\times$ rychleji, než díry) nebo na jeho aktuální poloze (záleží na tvaru elektrického pole v souladu se Shockley-Ramovým teorémem [7], [8]). Příklad časové závislosti signálu je na Obrázek 5.2.

5.3 PEXELOVÉ DETEKTORY

Jedním z typů polovodičových detektorů jsou pixelové, tedy matice nezávislých detekčních jednotek. Oproti druhé nejvýznamnější rodině - stripovým - nabízí a priori 2D rozlišení což



Obrázek 5.2: Časový vývoj proudového signálu generovaného mionem o energii 1 GeV v pixelu křemíkového. Model z programu Weightfield2 [9]. Oranžová křivka značí proud indukovaný pohybem děr, modrá pohybem elektronů a černá celkový.

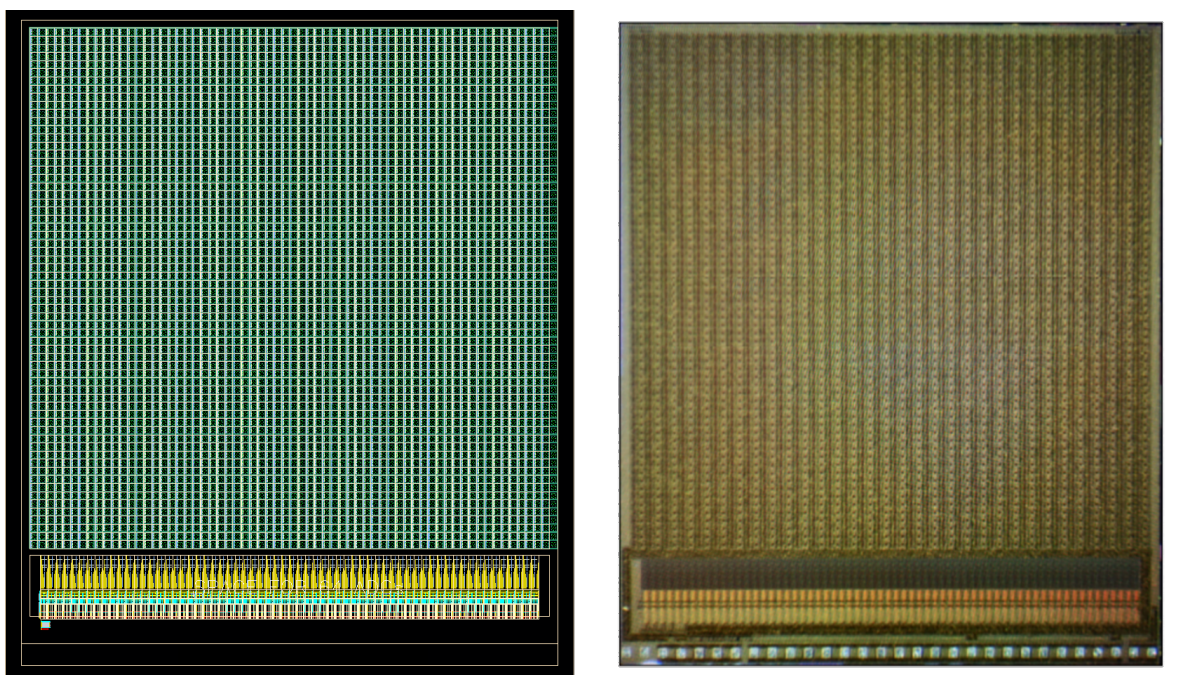
je pro účel příčného skenování elektronového svazku ideální.

5.4 X-CHIP03

Pro skenování elektronového svazku v rámci tohoto projektu byl zvolen X-CHIP03. Jde o monolitický¹ pixelový detektor tvořený maticí 64x64 pixelů o rozměrech $4.2 \times 5\text{mm}^2$.

Spodní energetická hranice pro detekci elektronů se pohybuje v oblasti okolo 70 keV, což je adekvátní volbě zdroje záření - elektronového děla - které by mělo dosáhnout energií až 100 keV.

¹V případě monolitických detektorů je na rozdíl od hybridních vyčítací část elektroniky umístěna ve stejném jednolitěm objemu křemíku jako senzitivní vyprázdněná oblast.

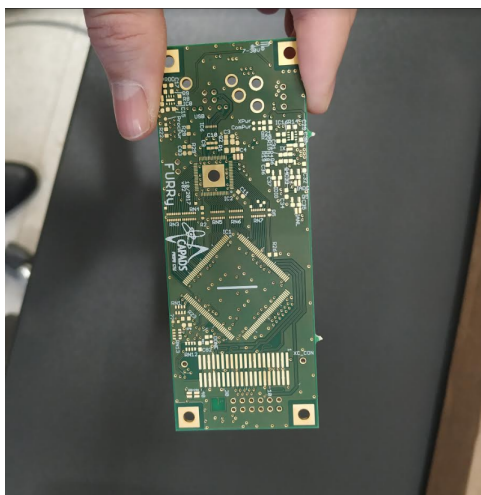


Obrázek 5.3: Model designu (vlevo) a fotografie (vpravo) detekčního čipu X-CHIP03.

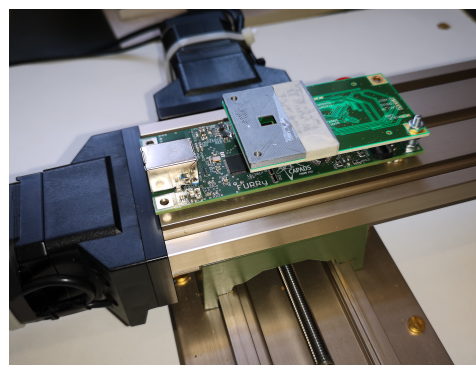
6 SET-UP DETEKTORU

Detekční čip X-CHIP-03, popsaný v předchozí kapitole, tvoří pouze část celého set-upu. Vyčítání dat je zprostředkováno read-outem FURRY, který je USB kabelem připojen k počítači vybavenému softwarem ASPIRE.

Sestavit read-out FURRY (viz Obr. 6.1) je nejnáročnějším úkolem této části projektu. Jde o plošný spoj obsahující mnoho komponent, které je třeba napájet přesně podle návrhu. K tomu slouží program Eagle, umožňující rychlou orientaci v designu read-outu, viz Obr. 6.2.

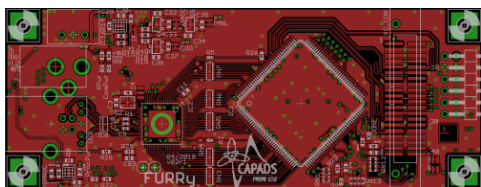


(a) Plošný spoj tvořící základ read-outu FURRY.

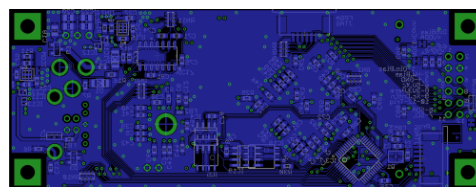


(b) X-CHIP-03 připojený na read-out FURRY.

Obrázek 6.1: FURRY před začátkem projektu a jeho budoucí podoba.



(a) Vrchní strana FURRY.



(b) Spodní strana FURRY.

Obrázek 6.2: Návrh FURRY vyhotovený v programu Eagle.

Jelikož osazení plošného spoje trvá mnoho hodin, pro účely testu nám byl zapůjčen funkční read-out FURRY.

Vakuová průchodka USB-USB, která je k propojení FURRY a počítače potřeba, se pohybuje cenově v řádu tisíců korun, proto jsme se rozhodli využít dostupné komponenty. Průchodka kf40, která je již součástí vakuové komory, má k dispozici 6 pinů, přičemž USB kabel vyžaduje pouze 4, viz Obr. 6.3. Ten jsme museli rozdělit na dvě části a přidat nástavce, které lze na piny připojit.



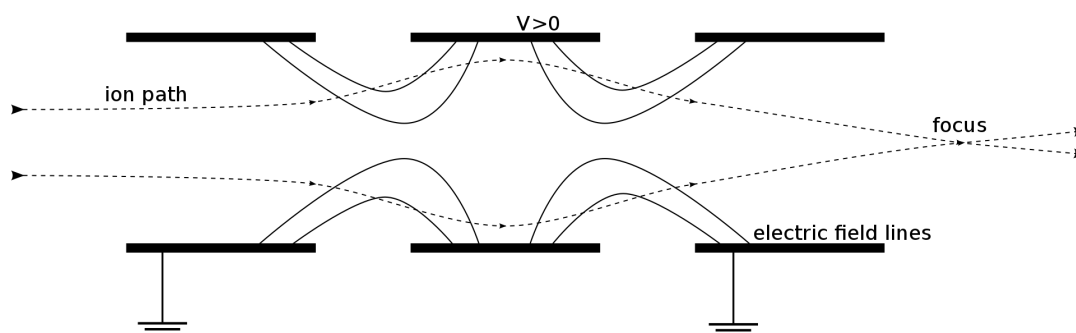
Obrázek 6.3: Test připojení USB kabelu na průchodku kf40 vakuové komory.

Read-out je ovládán softwarem ASPIRE. Jeho prostřednictvím lze nastavit počet snímků a rychlost snímkování. Elektronový paprsek také půjde sledovat v reálném čase. Potenciálním problémem vyčítacího systému je jeho ohřívání ve vakuové komoře. Při testu mimo vakuum jsme pozorovali ohřev v rámci jednotek stupňů, což by na funkci čipu nemělo žádný vliv. Předpokládáme ale, že ve vakuu bude docházet k většímu ohřevu. Pokud by přesáhl únosnou mez, byli bychom nuceni vyčítací část set-upu vyvést ven z vakuové komory, což by mohlo znamenat potíže v komunikaci s čipem. V krajním případě je ale možné tuto variantu realizovat.

7 FOKUSACE

Vlastnosti elektronového svazku jsme se rozhodli vylepšit pomocí fokusování. Mezi četnými metodami fokusace svazku jsme si vybrali fokusaci pomocí elektrostatické čočky. Konkrétně soustavu tří cylindrických elektrod v řadě za sebou. Na krajní elektrody je přivedeno stejné napětí a na prostřední jiné v závislosti na náboji svazku. Toto uspořádání se někdy také nazývá anglicky jako *einzel lens* a podobný systém fokusování se mimo jiné používá i v elektronových dělech v CRT obrazovkách [10]. Proto bychom se mohli domnívat, že elektronový svazek, se kterým budeme pracovat, bude dostatečně fokusovaný již na výstupu z elektronového děla, které nám slouží jako zdroj elektronů. Nicméně jelikož nevíme, jak moc bude tento svazek divergovat, může se schopnost upravovat svazek po cestě k detektoru v konečném uspořádání experimentu ukázat jako užitečná.

V principu se může podobná elektrostatická čočka skládat i z více elektrod. Její fokusační vlastnosti pak závisí na geometrii elektrod, na poměrech napětí na nich a v neposlední řadě na kinetické energii fokusovaného svazku. Jako prakticky nejjednodušší se jeví uspořádání složené ze tří cylindrických elektrod, přičemž krajní dvě jsou uzemněny a na prostřední je přivedeno nenulové napětí. Toto nastavení by nám mělo poskytnout dostatečnou variabilitu, protože při konstantní geometrii elektrod lze ohniskovou vzdálenost čočky výrazně měnit pouze nastavováním napětí na prostřední elektrodě. Schématický náčrt čočky je na Obr. 7.1.

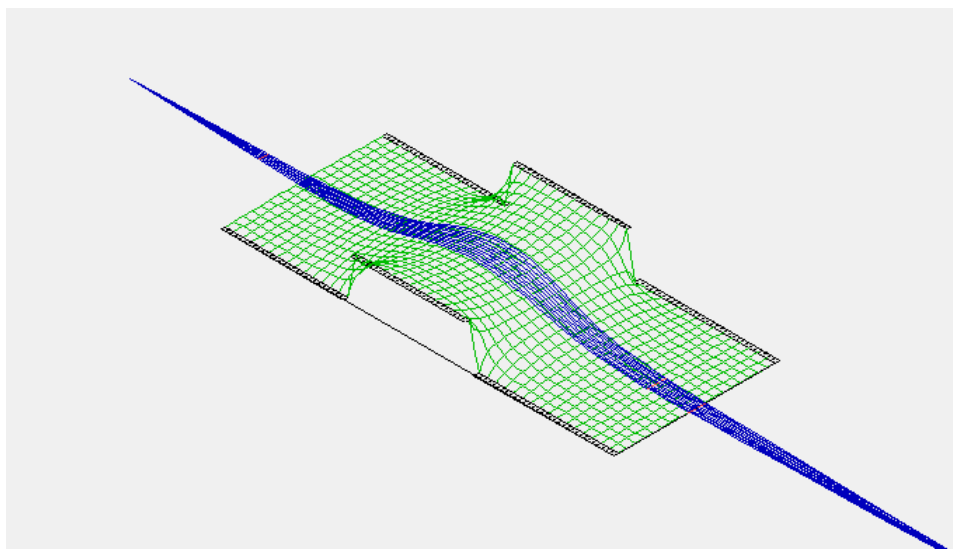


Obrázek 7.1: Schématický náčrt *einzel lens*. Čárkovaně jsou naznačeny trajektorie iontů, plné čáry znázorňují ekvipotenciály elektrického pole [11].

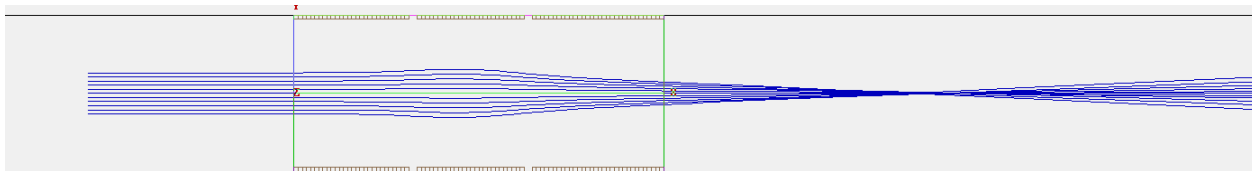
Polarita napětí na centrální elektrodě *einzel lens* je opačná náboji fokusovaného svazku, přesněji znaménko výsledného potenciálového rozdílu mezi první a centrální elektrodou musí být opačné. Pro elektrony tedy potřebujeme na centrální elektrodu přivést záporné napětí. Výsledkem tohoto nastavení je elektrické pole, ve kterém jsou elektrony při opuštění první elektrody zpomaleny v podélném směru a zároveň vytlačovány ve směru radiálním. Při příletu do druhé elektrody jsou dále zpomalovány v podélném směru, ovšem v menší míře, a jejich trajektorie jsou stáčeny zpět k ose čočky. V přechodu mezi druhou a třetí elektrodou jsou intenzivněji přitahovány ke středu v radiálním směru a v axiálním

opět nabírají rychlost. Při opuštění třetí elektrody by nakonec měly elektrony mít stejnou kinetickou energii jako na počátku, ale jsou nadále přitahovány k ose čočky. Aby síly přitahující částice radiálně překonaly divergenci svazku, musí elektrické pole mezi první a druhou elektrodou částice dostatečně zpomalit. Efekt elektrického pole na trajektorie částic ilustruje mapa potenciálu na Obr. 7.2.

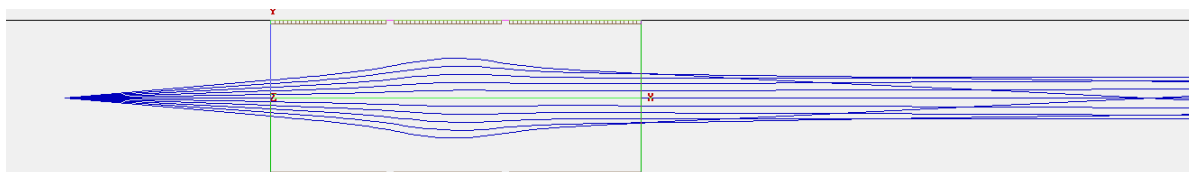
Pro určení fokusačních vlastností čočky při dané geometrii je třeba znát elektrický potenciál podél celé optické osy. Analytické určení elektrického pole v čočce a nalezení trajektorií částic v něm je složitá úloha. Pro simulaci elektrického potenciálu a pohybu nabitých částic skrz čočku lze použít například program SIMION [3]. Na Obr. 7.3 lze vidět simulaci trajektorií elektronů v demo verzi tohoto programu. Pro určení vhodného napětí na prostřední elektrodě v našem experimentu bude třeba znát parametry elektronového svazku, tedy především kinetickou energii elektronů, které jej tvoří. Dále bude nutné vhodně zvolit geometrii elektrod s přihlédnutím na velikost vakuové komory a ostatních součástí experimentu. Důležité bude i míra divergence svazku. Obr. 7.4 ukazuje, jak může čočka divergenci svazku "zastavit".



Obrázek 7.2: Mapa potenciálu elektrického pole *einzel lens* a trajektorie částic v rovině xz . Simulace v programu SIMION.



Obrázek 7.3: Simulace průletu elektronů elektrostatickou čočkou v programu SIMION. Počáteční kinetická energie elektronů je $E_k = 70$ keV, napětí na centrální elektrodě je $U = -53$ kV. Svazek je rozložen symetricky kolem osy čočky a jeho průměr je $d = 1$ cm. Celá soustava čočky měří $D = 9$ cm.



Obrázek 7.4: Fokusace divergujícího elektronového svazku elektrostatickou čočkou v programu SIMION. Počáteční kinetická energie elektronů je $E_k = 70$ keV, napětí na centrální elektrodě je $U = -53$ kV. Zdroj je umístěn $x_0 = 5$ cm před čočkou, úhel divergence je $\theta = 2^\circ$. Celá soustava čočky měří $D = 9$ cm.

8 VÝSLEDKY A DISKUZE

V průběhu zimního semestr jsme provedli první test elektronového děla v uspořádání popsaném v kapitole č. 4. Za použití rotační vývěvy jsme ve vakuové komoře získali tlak cca 70 Pa. V tomto testu jsme přivedli napětí 8 V na žhavení wolframového vlákna a 400 V na první urychlovací elektrodu. Při tomto zapojení jsme pouze pozorovali oranžovou tečku ve středu elektronového děla, kterou vysvětlujeme jako rozžhavené wolframové vlákno, ale žádné fluorescenční světlo z dopadajících elektronů na stínítko jsme nepozorovali. Ve druhé konfiguraci jsme zamýšleli připojit 8 V na žhavení wolframového vlákna a 20 kV na hlavní urychlovací elektrodu, nicméně na hlavní urychlovací elektrodu se nám podařilo přivést pouze cca 400 V. Při tomto zapojení jsme pozorovali fialové světlo s intenzitou úměrnou přivádějícímu proudu na hlavní urychlovací elektrodu. Dalším poznatkem bylo, že fialové světlo jsme viděli pouze mimo stínítko. Na Obr. 8.1 je fotografie pozorovaného fialového světla.



Obrázek 8.1: Fotografie fialového světla při zapojení hlavní urychlovací elektrody v konfiguraci se stínítkem.

Z toho důvodu jsme se rozhodli zapojit pouze hlavní urychlovací elektrodu a opět na ní přivést vysoké napětí, nicméně tentokrát v uspořádání bez stínítka. Opět jsme pozorovali fialové světlo vycházející z elektrody. Na Obr. 8.2 je fotografie pozorovaného fialového světla spirálovitého tvaru. Toto světlo si vysvětlujeme jako vakuový výboj mezi elektrodou a vakuovou komorou. Dále si myslíme, že nám tento výboj zabraňoval přivést vyšší napětí na elektrodu. Řešením tohoto problému by mohlo přinést zapojení turbomolekulární vývěvy, s kterou získáme až několik řádů lepší vakuum, čímž potlačíme šanci k těmto výbojům.



Obrázek 8.2: Fotografie fialového světla při zapojení hlavní urychlovací elektrody v konfiguraci bez stínítka.

REFERENCE

- [1] *Předmětová komise fyziky, Gymnázium F. X. Šaldy* [online]. Vedení elektrického proudu v plynech a ve vakuu, [citováno 5. 02. 2019] <<http://jan.gfxs.cz/studium/files/elektro/plyny.pdf>>
- [2] Mgr. Magda Zemánková ZŠ *Šumice* [online]. Vedení elektrického proudu v plynech, [citováno 5. 02. 2019] <http://www.zssumice.cz/wp-content/uploads/2016/01/10-proud_v_plynech.pdf>
- [3] *SIMION* [online]. Ion and electron optics simulator, [citováno 10. 02. 2019] <https://simion.com/definition/richardson_dushman.html>
- [4] *Circuit globe* [online]. [citováno 10. 02. 2019] <<https://circuitglobe.com/electron-gun.html>>
- [5] *Barclays Physics Wiki* [online]. [citováno 10. 02. 2019] <http://barclayphysics.wikia.com/wiki/The_Electron_Gun>
- [6] *Projektové praktikum* [online]. Rozptyl elektronů na fólii, KF FJFI ČVUT [citováno 10. 02. 2019] <https://physics.fjfi.cvut.cz/files/predmety/02PPRA/Docs/tdr_2010-11.pdf>
- [7] S. Ramo *Currents Induced by Electron Motion*. In: Proceedings of the IRE27.9 (září 1939), s. 584–585. I S SN: 0096-8390. D O I:10.1109/JRPROC.1939.228757.
- [8] W. Shockley *Currents to conductors induced by a moving point charge*. In: J. Appl. Phys.9 (1938), s. 635.25
- [9] Francesca Cenna et al *A fast simulator for silicon and diamond solidstate detector* [online]. [citováno 5. 02. 2019] <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215004842>>
- [10] HEDDLE, D. W. O. *Electrostatic lens systems*. 2nd ed. Philadelphia: IOP, c2000.
- [11] Příspěvatelé Wikipedie. *Einzel lens* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, [citováno 5. 02. 2019] <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Einzel_lens&oldid=874277407>