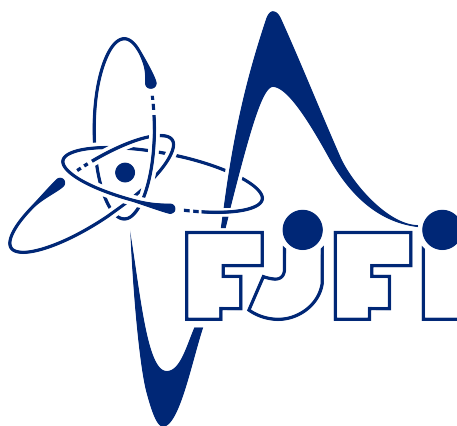


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky



Technical Design Report

Jiskrová komora

PPRA kolaborace

Praha, 2017/2018

PPRA kolaborace

Koordinátor projektu

Tomáš Herman

Mluvčí projektu

Jan Půček

Konstrukce

Tomáš Herman

Zuzana Moravcová

Plyn a plnění

Lukáš Marek

Ondřej Sedláček

Trigger a scintilátory

Veronika Agafonova

Valentina Raskina

Napájecí zdroje

Jan Půček

Pavel Gajdoš

Obsah

Úvod	1
Kosmické záření	1
1 Konstrukce	3
1.1 Vnější konstrukce	3
1.2 Vnitřní konstrukce	8
2 Plyn a plnění	10
2.1 Parametry plnicího média a přivedené napětí	11
2.2 Technické zapojení přívodu/odvodu plynu	11
2.3 Plnění plynu	13
3 Trigger a scintilátory	15
3.1 Scintilátor, WLS vlákna a lavinová fotodioda	16
3.2 Testování vlastností scintilátorů a APD	18
3.3 Trigger	20
4 Napájecí zdroje	22
4.1 Technické zpracování	22
4.2 Testování vlastností	24
4.3 Doporučení	26
5 Závěr	27

Úvod

Jeden ze základních typů detektorů sloužících k přímému zobrazení dráhy částic je jiskrová komora. Její funkce spočívá v detekci částic s nenulovým elektrickým nábojem, které ionizují plyn v citlivém objemu komory. Detektor se skládá z utěsněné komory obsahující několik paralelních deskových elektrod a pracovní plyn. Vrchní a spodní část komory je překryta scintilátory, které společně s koincidenční jednotkou zajišťují triggerování detektoru pouze za přítomnosti částice, která byla detekována spodní i vrchní podstavou komory. Pokud je tato podmínka splněna, dojde k vyslání pulzu vysokého napětí na elektrody, tak aby mezi jednotlivými deskami vzniklo elektrické pole. Napětí je voleno těsně pod hodnotou průrazného napětí, čímž dojde ke vzniku sérií výbojů pouze v místech, kde je lokálně snížena hodnota průrazného napětí z důvodu ionizace plynu. Jelikož elektricky nabitá částice ionizuje plyn podél své trajektorie, tak série výbojů mezi elektrodami kopíruje trajektorii této částice.

Tato zpráva je uvedena popisem funkce jiskrové komory a částic kosmického záření, které bychom rádi detekovali, jejich energie a očekávanou frekvencí průletu naší komorou. V Kapitole 1 je popsána realizace vnější a vnitřní konstrukce jiskrové komory. Dále v Kapitole 2 je odůvodněn výběr plnicího média, zobrazena konstrukce přívodu plynu a uveden protokol plnění komory. Kapitola 3 popisuje úlohu triggeru v jiskrové komoře. Jsou předvedeny vlastnosti použitých součástek, včetně vlastností použitého WLS vlákna (Wavelength Shifting), použité lavinové fotodiody a také schéma celého triggeru. Část je také věnována testování scintilátoru a stavbě logického obvodu. V poslední Kapitole 4 je popsán vybraný způsob vytváření vysokého napětí, průběh testování parametrů a nakonec jsou vydána doporučení, která by měla citelně zlepšit hodnoty sestaveného zdroje.

Kosmické záření

Hlavním zdrojem částic jiskrové komory bude kosmické záření, které neustále dopadá na zemský povrch. Prakticky lze rozdělit kosmické záření na primární a sekundární, kde primární jsou stabilní částice urychlené kosmickými zdroji a sekundární způsobuje interakce primárního záření se zemskou atmosférou. V konečném důsledku je vynaložena snaha především detekovat nabitě miony dopadající na zemský povrch, které tvoří majoritní

složku sekundárního záření¹. Jejich průměrná energie při průletu komorou je přibližně ≈ 4 GeV s integrální intenzitou $I \approx 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ a úhlovou distribucí $\approx \cos^2 \theta$ (úhel θ je odečítaný od kolmice spjaté s místem dopadu). Pomocí těchto údajů lze dopočítat frekvenci průletu mionů komorou s vrchní podstavou o obsahu S :

$$\nu = IS \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = \frac{140\pi}{3} S. \quad (1)$$

Pokud je podstava čtvercová se stranou o délce 0,2 m je výsledná frekvence: $\nu \cong 5,86 \text{ s}^{-1}$ [1]. Jak bylo řečeno na začátku, je ale zapotřebí, aby mion proletěl vrchní i spodní podstavou komory, čímž se vrchní výsledek redukuje. Výpočet integrálu v rovnici 1 se tím podstatně zkomplikuje.

¹Další komponentou záření jsou např. protony, neutrony, elektrony, pozitrony, piony aj.

Kapitola 1

Konstrukce

Následující kapitola je věnována mechanickému řešení vnější a vnitřní konstrukce jiskrové komory.

1.1 Vnější konstrukce

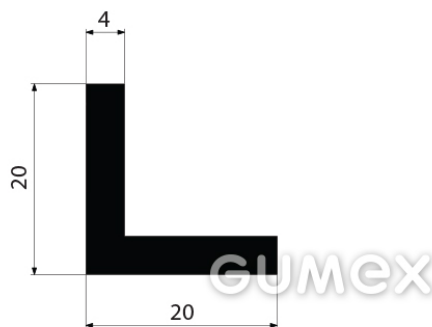
Pro konstrukci jiskrové komory byl zvolen design s vnější konstrukcí ve tvaru kváдру a s obdélníkovými elektrodami, které jsou umístěné uvnitř komory. Tento návrh je znázorněný na Obr. 1.1, byl navržený pro fungování komory v přetlaku. Stěny komory jsou znázorněny černě a kompaktní pryžové těsnění mezi podstavou a horní částí komory oranžově. Design minimalizuje působení přetlaku uvnitř komory na spoj vrchní části komory s její podstavou.

Kvádrová vrchní část konstrukce drží pohromadě pomocí šroubů a pro dokonalé utěsnění spojů je mezi jednotlivé desky nanesen sklenářský silikon Den Braven, který se používá při lepení akvárií. Podstava komory se skládá ze dvou desek. První deska je uchycena k nohám konstrukce a má závit pro šrouby, které pevně drží vrchní část vnější konstrukce jiskrové komory k její podstavě. Druhá deska má rozměry těsně menší než vrchní kvádr vnější konstrukce a je umístěna uvnitř jiskrové komory. Tato deska slouží především ke snížení síly, kterou vytváří přetlak uvnitř komory na spoj konstrukce s podstavou. Obě spodní desky jsou dohromady drženy závitovými tyčemi se závitem M10, na kterých jsou upevněné i elektrody. Takto spojené desky vytváří L profil, do kterého přiléhá vrchní část vnější konstrukce komory.



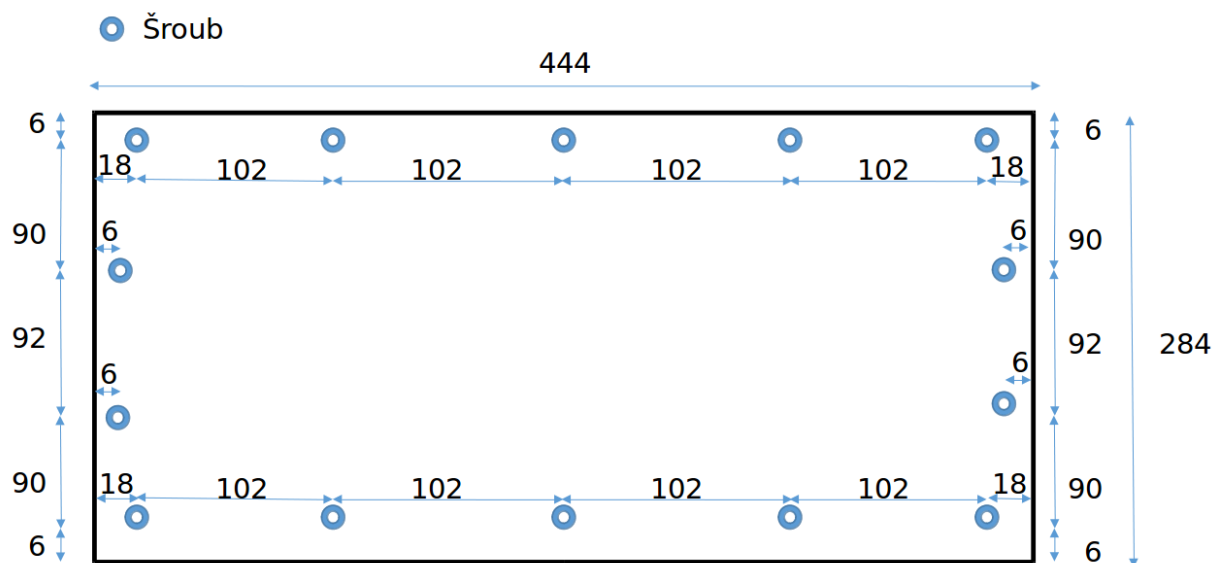
Obrázek 1.1: Schéma průřezu konstrukce jiskrové komory pro práci v přetlaku. Černou barvou jsou znázorněny plexisklové stěny komory a oranžovou pevné gumové těsnění.

Aby bylo možné komoru opakovaně otvírat a zavírat, je mezi podstavou a vrchní částí desky umístěn kompaktní pryžový L profil s rozměry $20 \times 20/4$ mm (Obr. 1.2), pro utěsnění spoje. Pryžové těsnění bylo zakoupeno u firmy Gumex s kódovým označením 00536215. Finální úprava na požadované rozměry byla provedena zalamovacím nožem rozpáleným pomocí příručního hořáku. Řezy musely být vedeny přesně pod úhlem 45° a proto byly prováděny pomocí úhelníku. Aby těsněním mohli procházet šrouby upevňující komoru k podstavě, byly do něj udělány otvory pomocí ručního děrovače.

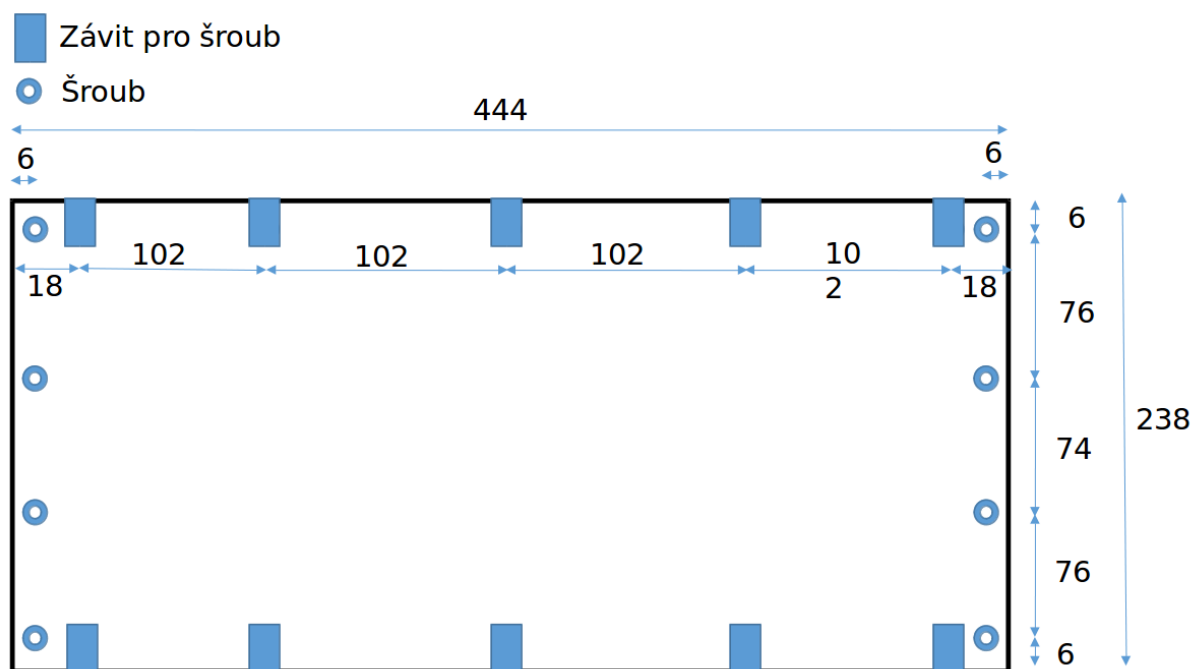


Obrázek 1.2: Schéma použitého kompaktního pryžového L profilu pro utěsnění komory.

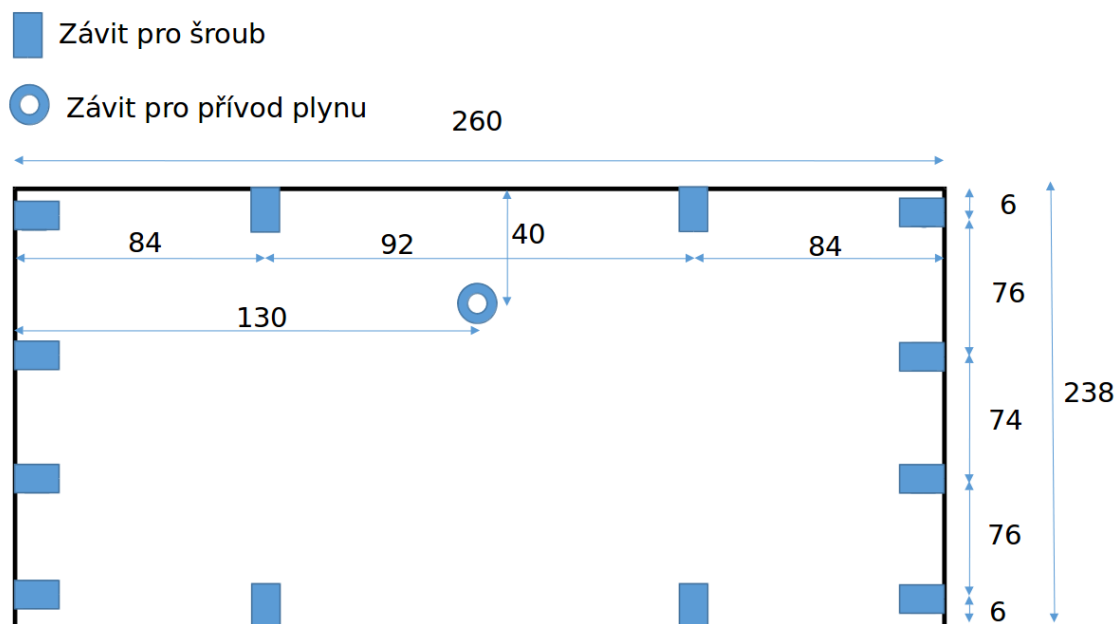
Finální venkovní rozměry jiskrové komory jsou $444 \times 284 \times 238$ mm bez podstavy, která má rozměry 444×604 mm. Tloušťka všech desek je 12 mm a desky jsou z litého plexiskla (polymethylmethakrylátu). Podrobné nákresy jednotlivých desek, podle kterých bylo nakoupené plexisklo nařezáno a opatřeno závity, jsou na Obrázcích 1.3 (vrchní deska), 1.4 (přední a zadní bočnice), 1.5 (levá bočnice), 1.6 (pravá bočnice), 1.7 (postava), 1.8 (vnitřní deska). Všechny uvedené rozměry v nákresech jsou v milimetrech a vzdálenosti jsou uváděny od krajů desek a středů závitů.



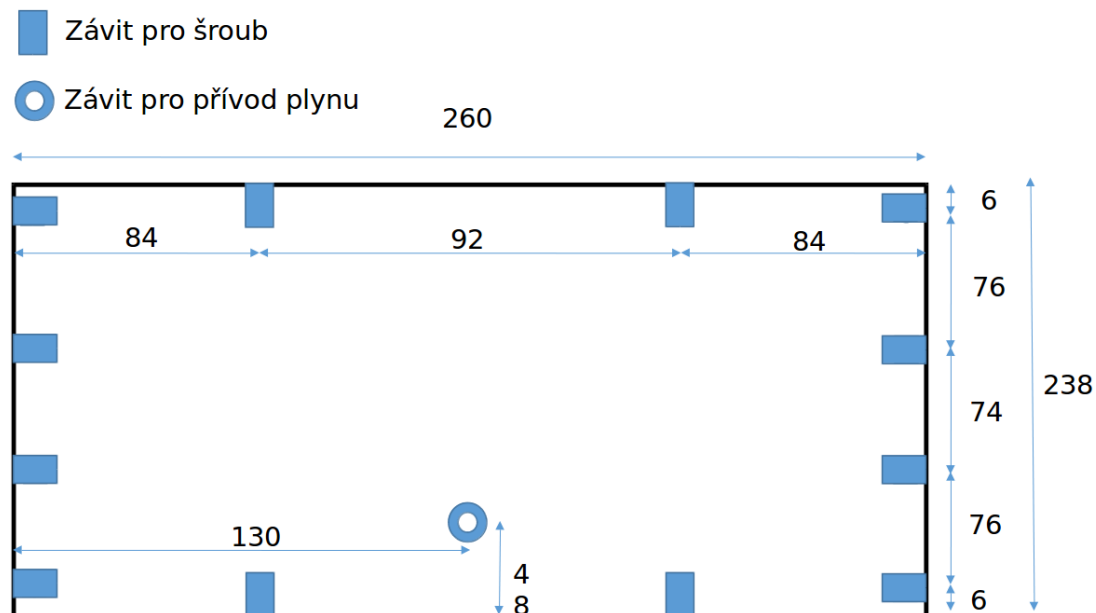
Obrázek 1.3: Nákres vrchní desky konstrukce jiskrové komory. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech a vzdálenost je uváděna od středu závitů.



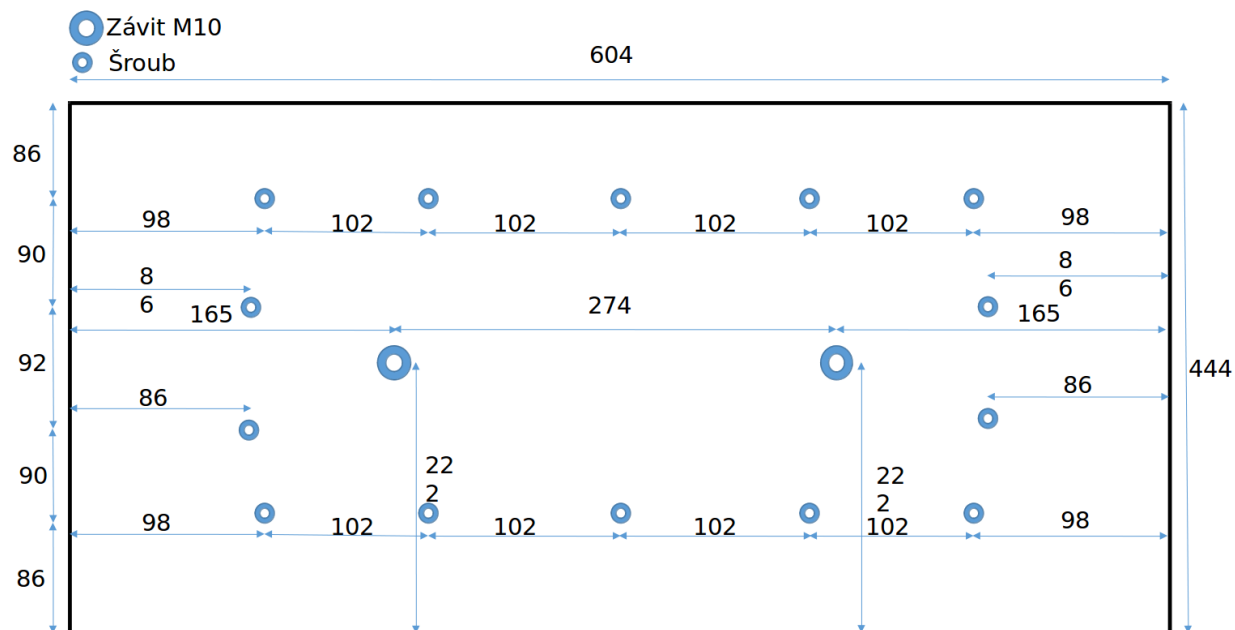
Obrázek 1.4: Nákres přední a zadní boční desky konstrukce jiskrové komory. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech a vzdálenost je uváděna od středu závitů.



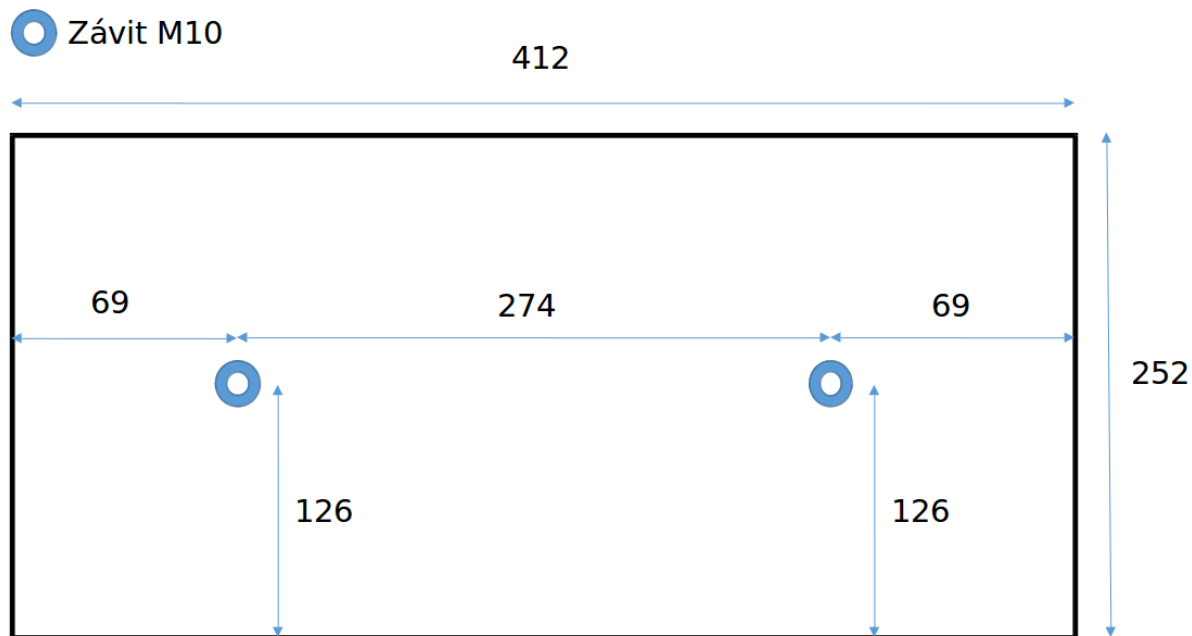
Obrázek 1.5: Nákres levé boční desky konstrukce jiskrové komory. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech a vzdálenost je uváděna od středu závitů.



Obrázek 1.6: Nákres pravé boční desky konstrukce jiskrové komory. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech a vzdálenost je uváděna od středu závitů.

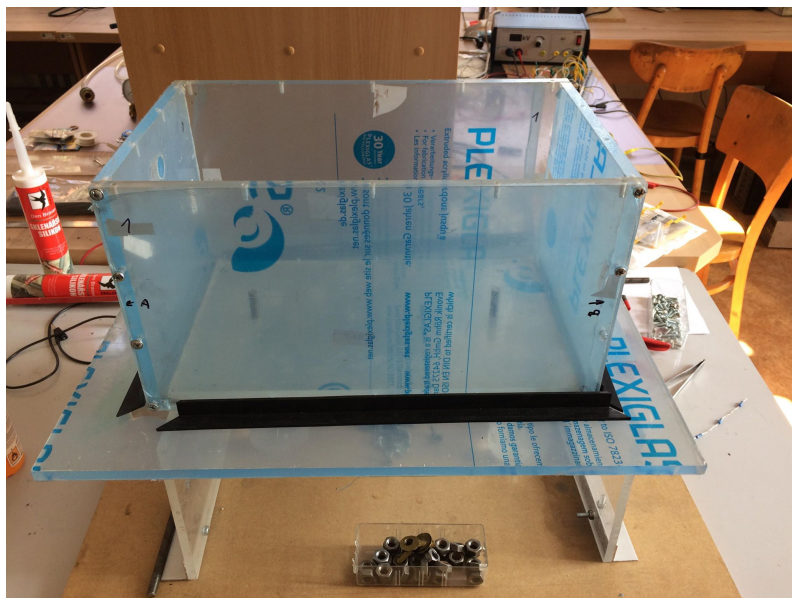


Obrázek 1.7: Náskres podstavy konstrukce jiskrové komory. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech a vzdálenost je uváděna od středu závitů.



Obrázek 1.8: Náskres vnitřní desky konstrukce jiskrové komory. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech a vzdálenost je uváděna od středu závitů.

Fotografie částečně sestavené vnější konstrukce jiskrové komory se nachází na Obrázku 1.9. Komora je bez vrchní desky a na podstavě se nachází nařezaný pryžový L profil.



Obrázek 1.9: Fotografie vnější konstrukce jiskrové komory bez vrchní desky a s nařezaným pryžovým těsněním.

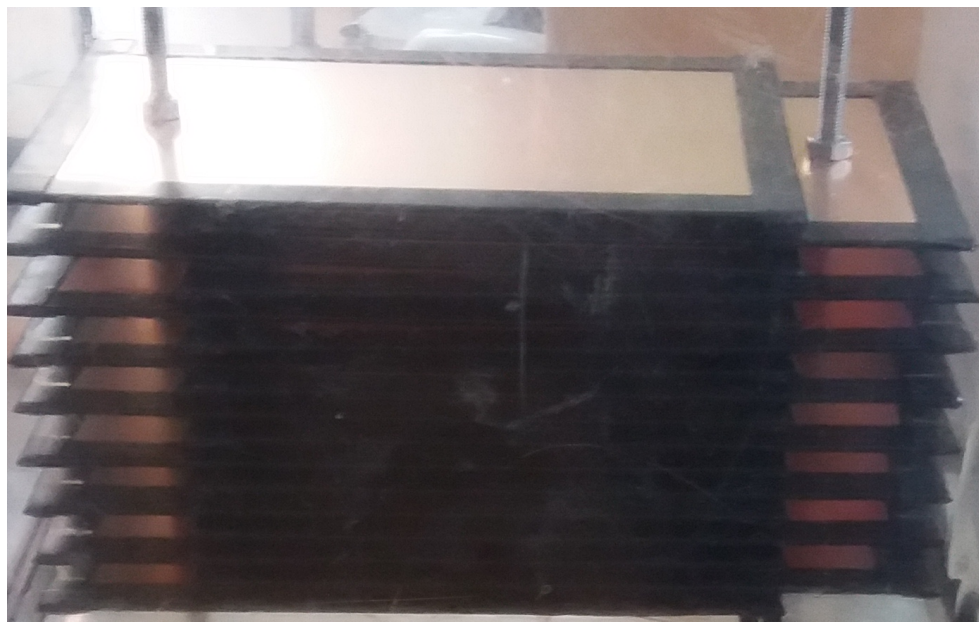
1.2 Vnitřní konstrukce

Pro tvorbu homogenního elektrického pole uvnitř jiskrové komory jsou elektrody ve vnitřní části konstrukce vyrobeny z cuprexitových desek používaných pro výrobu plošných spojů. Desky se skládají z jádra z odolného plastu, na kterém je nanесena 35 μm tlustá vrstva mědi. Desky mají rozměry 300 $\times$ 200 $\times$ 1,5 mm. Aby nedocházelo k výbojům na ostrých hranách desek, jsou tyto hrany obaleny samo-vulkanizační izolační páskou EMOS self-fusing tape o tloušťce 0,75 mm a dielektrickou pevností 12 kV/mm. To pro rozměry pásky znamená izolaci s dielektrickou pevností 9 kV.

V deskách jsou vyvrtány otvory s průměrem 10 mm, které se nacházejí 9 cm od delšího okraje desek a 3 cm od kratšího okraje desek. Tyto otvory slouží k upevnění desek na závitou tyč se závitkem M10. Tyto tyče mají dvojí úlohu. Fungují jako nosná kostra pro upevnění jednotlivých cuprexitových desek. Vzdálenost jednotlivých desek od sebe je řízena pomocí železných matek. Pro větší stabilitu desek, na které po přivedení vysokého napětí působí elektrostatická síla, a jejich konstantní vzdálenost jsou mezi jednotlivé desky ještě umístěny pryžové kvádríky. Tyto kvádríky jsou umístěny na opačné straně než je daná deska upevněna ke kovové tyči. Pro izolaci pryžových kvádríků je mezi ně a samotné desky ještě umístěn izolující gumový pás. Další úlohou závitových tyčí je přívod vysokého napětí na jednotlivé elektrody. Elektrody jsou střídavě upevněny k jedné a druhé závitnici

a tím vzniká v komoře homogenní elektrické pole. Celkem je na jedné tyči upevněno devět elektrod a na druhé osm. Tyče procházejí ven z komory závitem v podstavě konstrukce, kde je na ně pomocí kabelů s banánky přivedené napětí z vysokonapěťového zdroje.

Finální podobu vnitřní části konstrukce lze vidět na Obrázku 1.10.



Obrázek 1.10: Fotografie vnitřní konstrukce.

Kapitola 2

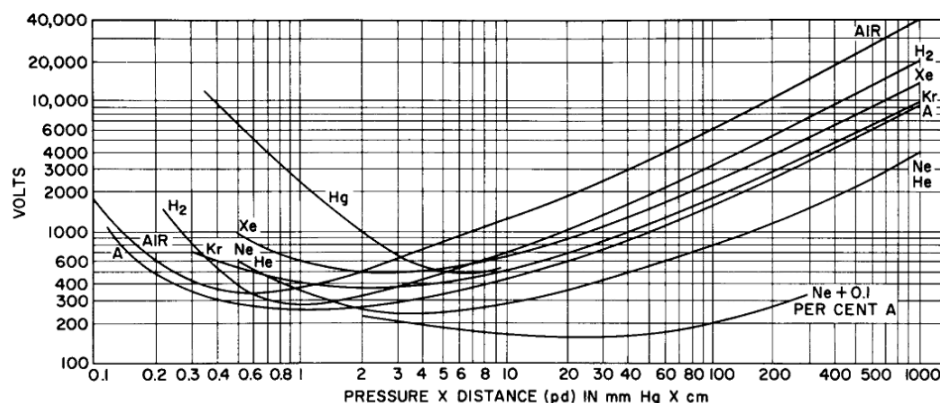
Plyn a plnění

Nedílnou součástí jiskrové komory je plnicí medium, které svými vlastnostmi určuje hlavní charakteristiky elektrického výboje. Jedna z hlavních otázek je především výběr daného média/plynu a s tím související problém provozního tlaku, který přímo ovlivňuje samotnou konstrukci komory. V rámci jiskrového výboje je zároveň potřeba nastavit správný poměr mezi přivedeným napětím na kondenzátorové desky a výše zmíněným tlakem.

Pro podrobnější odůvodnění a další diskusi je zapotřebí zmínit základní způsob tvorby elektrického výboje a dalších jevy, který tento proces doprovází. Při průletu částice plynem dochází k tzv. *primární ionizaci*, vytváření volných elektronů a kladných iontů. Tyto primární volné páry jsou za pomoci přivedeného vysokého napětí na desky urychleny, čímž dojde k produkci dalších elektron-iontových párů, k tzv. *lavinové produkci*. Urychlovací napětí je voleno pod hodnotu *průrazného napětí* (viz Obrázek 2.1). Při tomto napětí dochází k výboji v médiu i bez nutné přítomnosti primárních párů. Jelikož je žádoucí zobrazit dráhu částice, musí být přivedené napětí menší než průrazné napětí.

Oba tyto prvotní procesy jsou doprovázeny širokou škálou jevů, které svou podstatou buď snižují nebo zvyšují celkovou hustotu volného elektrického náboje. Mezi základní redukční principy patří zejména *rekombinace*, *zachycení* a *drift*, případně *difúze*. Za základní produkční mechanismy je hlavně označována *sekundární ionizace* kladných iontů a elektronů, *ionizace neutrálními molekulami*, *fotoionizace* a *elektronové uvolnění* záporného iontu (podrobnější vysvětlení viz [2]).

Samotné vytvoření jiskrového výboje lze již ze stádia lavinové ionizace popsat s pomocí driftu/difúze, rekombinace a fotoionizace. Vytvořený volný elektrický náboj v přítomnosti vnějšího pole driftuje/se přesouvá směrem k opačné polaritě, čímž vzniká v médiu vnitřní pole, které svou intenzitou působí proti poli vnějšímu. Po nahromadění dostatečného náboje dojde k úplnému odstínění tohoto vnějšího pole a v objemu převládne proces rekombinace, který vytvoří neutrální molekuly a fotony, které mohou nadále fotoionizovat neutrální molekuly plynu. V konečném důsledku se ionizace šíří k obou elektrodám až do jejich spojení, kdy vznikne vodivý kanál plasmatu, elektrický výboj (téměř okamžitě přenese volný náboj do elektrod).



Obrázek 2.1: Paschenův zákon pro různé plyny. Převzato z [3]

2.1 Parametry plnicího média a přivedené napětí

Jako základní plnicí médium byl zvolen inertní plyn argon (Ar). Vzhledem k nulové hodnotě elektrické afinity neutrálních molekul Ar, nedochází v jejich případě k elektronovému zachytu (jedná se o obecnou vlastnost všech inertních plynů).

Z hlediska cenového srovnání mezi dalšími zástupci vzácných plynů, jako je především helium (He) a neon (Ne), vychází argon nejlépe. Vzhledem k vysoké elektronové afinitě kyslíku jsou kladeny nároky na čistotu dané směsi a zároveň na konstrukci komory.

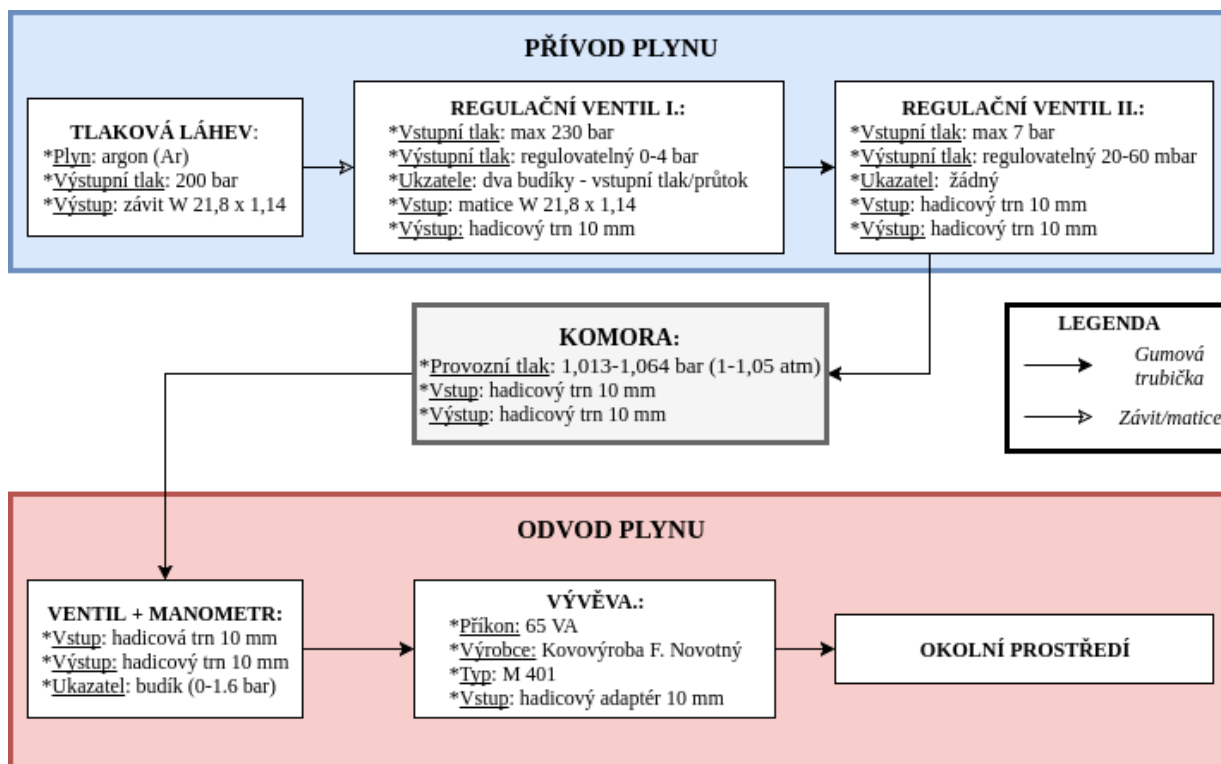
Jelikož většina dodávaných tlakových lahví s Ar má velmi malý podíl dalších plynů (čistota Ar 99,998%), bylo především zapotřebí vyřešit problém s případnými netěsnostmi komory. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto namísto podtlaku (klade nižší požadavky na hodnotu průrazného napětí) využít mírný přetlak. Důvodem je, že přetlak časem vytěsní nečistoty pocházející ze vzduchu, avšak i v tomto případě je zapotřebí, aby případné netěsnosti byly minimální a nedocházelo k velkým únikům Ar.

Jednou z diskutovaných možností byla přítomnost tzv. *stálého napětí*, které by především sloužilo pro čištění komory od volného reziduálního náboje z předchozího výboje a zároveň by snižovalo koeficient rekombinace pro právě probíhající detekci. Tento koncept byl v konečném řešení odložen na základě poznámky v [4] a v případě nutnosti by byl operativně dořešen.

2.2 Technické zapojení přívodu/odvodu plynu

Hlavní části starající se o přívod a vývod plynu lze vidět na Obrázcích 2.4, 2.5 a 2.3 a celkový obvod je zobrazen na schématu 2.2.

Začátek obvodu je tlaková láhev s Ar a výstupním tlakem 200 bar, který je veden do prvního regulačního ventilu (většinou dodáván se samotnou láhví). Hlavní úlohou je snížit



Obrázek 2.2: Celkové zapojení přívodu a odvodu plynu s vlastnostmi daných částí.

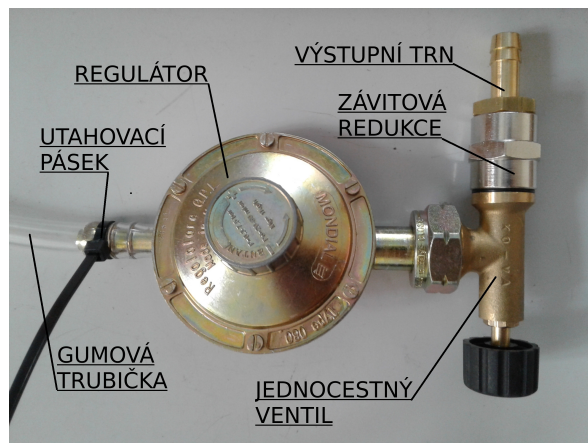
výstupní tlak plynu řádově na několik barů, aby jej druhá fáze regulačního ventilu zmenšila až na přetlak setin barů (20-60 mbar).

Tento druhý ventil je provozován při tlaku maximálně do 7 barů a je opatřený otočným regulátorem. Jak lze vidět na obrázku 2.3 muselo být konečné zapojení řešené za pomoci jednocestného ventilu (obvykle využívaný pro propan-butan láhve), který je schopen typem a velikostí svých vstupních/výstupních závitů spojit regulátor s hadicovým trnem (s použitím závitové redukce a teflonové pásky).

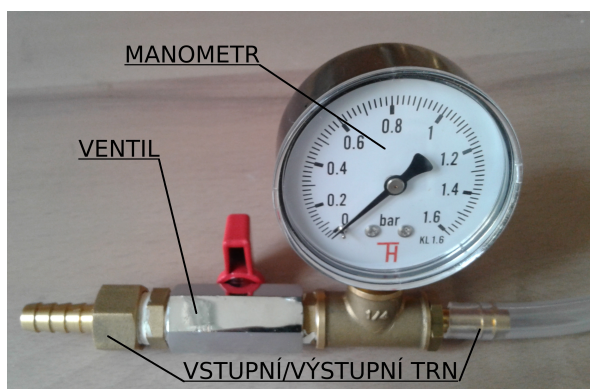
Napojení mezi prvním a druhým regulačním ventilem bylo uskutečněno gumovou trubičkou o vnitřním průměru 10 mm, která byla zajištěna jednorázovým stahovacím páskem (obdobný postup měl být použitý pro všechny další spoje s trubičkou).

Výstup z druhého regulačního ventilu je opět trubičkou spojen s utěsněnou komorou, která je opatřena hadicovým trnem pro přívod a odvod plynu. Vývod plynu je veden do části s uzavíratelným ventilem a manometrem ¹, viz Obrázek 2.5. Výstupní hadicový trn připojený k manometru na Obrázku 2.4 slouží k připevnění vývěvy, která je použita pro odsávání vzduchu do okolního prostředí, podrobněji viz sekce 2.3.

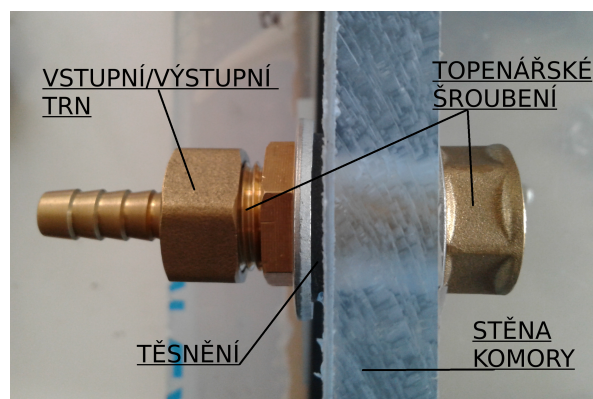
¹Tento manometr slouží pouze jako přibližný ukazatel tlaku kvůli jeho přesnosti a pro případně přesnější měření měl být zapůjčen manometr digitální, který by nahradil tento analogový.



Obrázek 2.3: Zapojení regulátoru do přívodného obvodu pro plyn.



Obrázek 2.4: Zapojení kontrolního manometru společně s ventilem pro uzavěr výstupního obvodu.



Obrázek 2.5: Vstupní/výstupní plynové zapojení.

2.3 Plnění plynu

Princip plnění komory operačním plynem je následující:

- Pomocí vývěvy se uzavíratelným výstupem odstraní většina vzduchu a tím i většina nežádoucích nečistot jako například kyslík, viz diskuze v 2.1 a [2].
- V dalším kroku se uzavře výstup komory a otevře se hlavní ventil (součást prvního regulačního ventilu) na tlakové láhvi s operačním plynem.
- Pomocí regulačního mechanismu se komora naplní na požadovanou hodnotu tlaku a následně se hlavní ventil na tlakové lahvi uzavře.
- Během samotného provozu je zapotřebí sledovat jak rychle klesá tlak v komoře v důsledku netěsností.

- V případě potřeby se ventil na tlakové láhvi otevře a za pomoci redukčního mechanismu se v komoře opět nastolí požadovaná hodnota tlaku (tímto způsobem ji lze udržovat i konstantní za cenu většího úniku plynu).

Při kroku 1) dochází k vytvoření výrazného podtlaku, je potřeba brát v úvahu konstrukci komory a být s odsáváním vzduchu opatrný. Během tohoto kroku nemusí dojít k odstranění dostatečné množství nečistot, které mohou stále bránit funkčnosti komory. Pro zvýšení čistoty pracovního plynu v komoře po určitou dobu slouží krok 5), kdy se do komory kontinuálně pouští operační plyn vyrovnávající ztráty způsobené netěsnostmi.

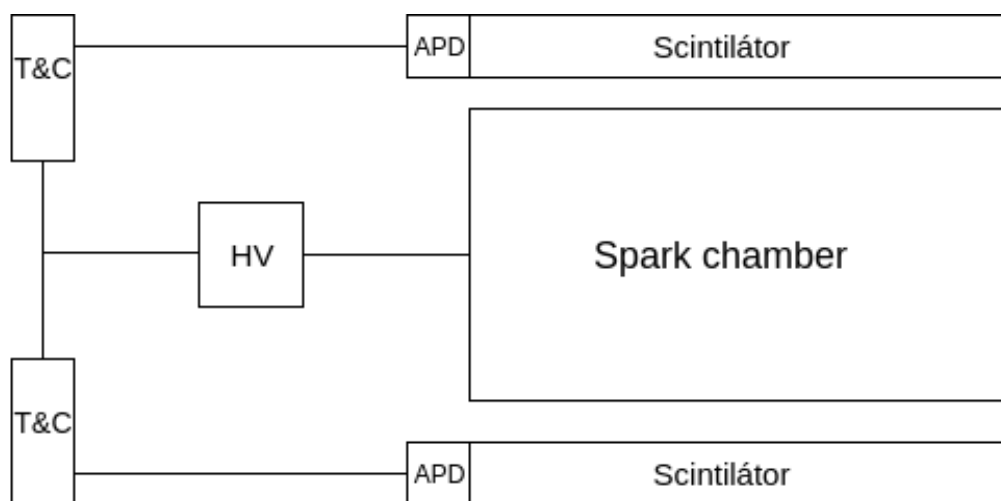
Tento postup může být ovlivněn několika faktory, které jsou závislé na těsnosti komory a potřebné době funkčnosti. V případě příliš velkých úniků plnicího média se nesmí realizovat krok 5) a dané netěsnosti musí být odstraněny ve spolupráci se skupinou starající se o konstrukci. Ačkoliv Argon není jedovatý, vytěsňuje vzduch a při zvýšené koncentraci v okolním prostředí může docházet k nedostatku vdechovaného kyslíku. Pokud během kroku 4) klesl tlak na 1 atm, je třeba brát v úvahu možné zvýšení kontaminace kyslíkem a dalšími nečistotami, které mohou omezit funkčnost komory. V tomto případě je zapotřebí opakovat opakovat krok 1) až 3) (a pokračovat s krokem 4)).

Závěrem je třeba zmínit, že zde zmíněný postup plnění nebyl otestován, neboť konstrukce byla sestavena až na poslední chvíli (stále bez vyřešeného těsnění). V textu jsou proto nastíněny některé očekávané problémy a jejich řešení. Testování izolace komory je vhodné provést levnějším plynem, například dusíkem, či stlačeným vzduchem. Plnění operačním plynem je třeba až při prověřování potřebné čistoty plynu pro správný chod komory.

Kapitola 3

Trigger a scintilátory

Jiskrová komora je zařízení, pomocí kterého se dá registrovat nabité částice. V našem případě jsou to miony. Schéma zapojení naší jiskrové komory je na Obrázku 3.1. Pro registraci mionů z kosmického záření jiskrovou komorou je nutno na elektrody v komoře přivést vysoké napětí. Toto napětí bude na desky přiváděno jen v okamžiku, kdy komorou proletí mion. Pro detekci průletu mionu komorou a následné vyslání signálu k přivedení vysokého napětí na elektrody v jiskrové komoře se používají scintilátory a obvod s triggerem. Mion je registrován v případě, že oba scintilátory (z nichž je jeden umístěn nad komorou a druhý pod ní) zaznamenají signál. V případě, že tyto signály z obou scintilátorů jsou v koincidenci, se vyšle signál ke spuštění vysokého napětí na elektrody jiskrové komory.

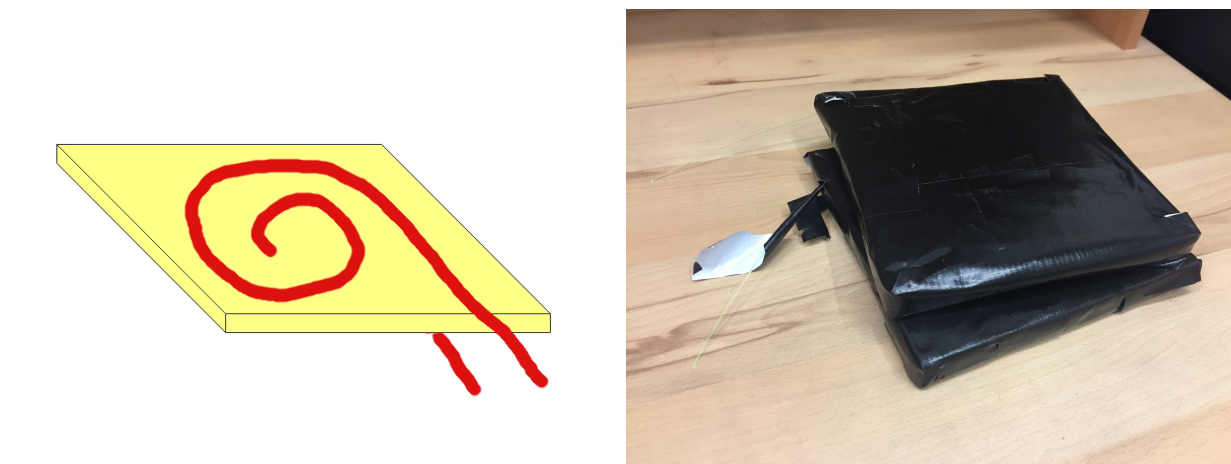


Obrázek 3.1: Schéma zapojení jiskrové komory, kde HV je zdroj vysokého napětí, T&C je triggerovací obvod a koincidence signálů, APD je lavinová fotodioda.

Následující podkapitoly budou popisovat sestavení a testování vlastností jednotlivých součástí.

3.1 Scintilátor, WLS vlákna a lavinová fotodioda

Po dopadu částice na scintilátor se sbírají emitované fotony pomocí WLS (Wave Length Shifters) vláken. Geometrie umístění WLS vláken na scintilátoru je znázorněno na Obr. 3.2 vlevo.



Obrázek 3.2: Vlevo: Schéma umístění WLS vláken na scintilátoru. Vpravo: Fotografie scintilátoru s WLS vlákny.

Hustota	1,03 g/cm ³
Index lomu světla	1,57
Světelný výtěžek	65 % (vzhledem k antracenu)
Doba dosvitu	2,5 ns
Maximální vlnová délka	420 - 440 nm

Tabulka 3.1: Vlastnosti použitého scintilátoru [5].

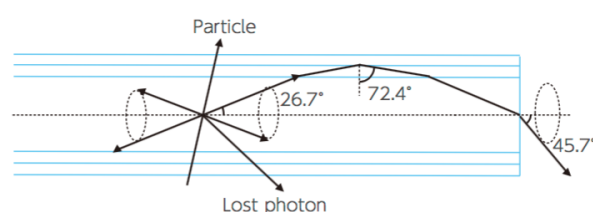
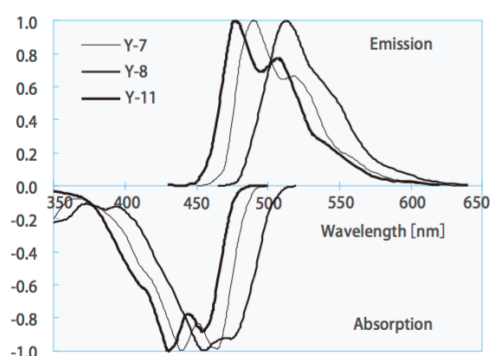
WLS vlákna jsou přilepena na obou stranách scintilátoru ve tvaru spirály (viz Obrázek 3.2 vlevo) pomocí lepidla LOCTITE 3494 [6]. Toto lepidlo bylo vybráno kvůli optickým vlastnostem podobným scintilátoru (index lomu vytvrzeného lepidla je 1.5 a index lomu scintilátoru je 1.57.) Pro navýšení účinnosti přechodu fotonů jsou vlákna rovněž pokryta silikonovým optickým gelem. Na Obrázku 3.2 vpravo je fotografie používaných scintilátorů společnosti NUVIA [5], jejichž vlastnosti jsou popsány v Tabulce 3.1.

V našem detektoru jsou použity zelené WLS vlákna typu Y-11(200)M od Kuraray, jejichž základní vlastnosti jsou popsány v Tabulce 3.2 a zobrazeny na Obrázku 3.3.

Typ	$peak_{em.}[\text{nm}]$	$peak_{em.}[\text{nm}]$	$d[\text{mm}]$	n	$\varepsilon[\%]$	P[%]
Y-11(200)M	476	430	1,0	1,59	5,4	30

Tabulka 3.2: Vlastnosti použitých WLS vláken: píky emisního a absorpčního spektra, průřez, index lomu jádra, účinnost absorpce fotonů, pravděpodobnost, že vyzářené fotony neopustí WLS vlákno, převzato z [7].

Y-7, Y-8, Y-11



Obrázek 3.3: Vlevo: Emisní a absorpční spektrum WLS. Vpravo: Průchod částic vlákem. Převzato z [7].

Pro minimalizaci úniku fotonů jsou scintilátory zabalené do hliníkové fólie. Přes fólii jsou scintilátory oblepeny neprůhlednou černou páskou.

K převedení fotonů ze scintilátoru na elektrický signál byla použita lavinová fotodioda (Avalanche PhotoDiode neboli APD), Si APD Hamamatsu S5343, jejíž vlastnosti jsou shrnuty v Tabulce 3.3. Velikost citlivé plochy je kompatibilní s obsahem průřezu vlákna wavelength shifteru.

Citlivá plocha	0,78mm ²
Pík senzitivity	650 nm při 25°C
Kvantová účinnost	80 %
Zesílení	50×
Při reverzním napětí	420 - 440 nm

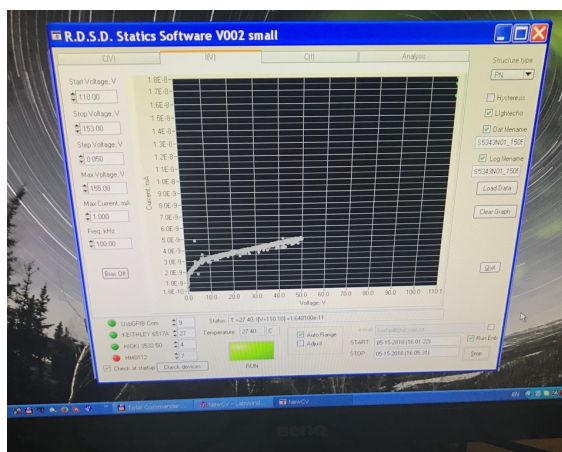
Tabulka 3.3: Vlastnosti Si APD Hamamatsu S5343 [8].

3.2 Testování vlastností scintilátorů a APD

Pro testování charakteristik příslušných součástek byla použita experimentální sestava v laboratoři ÚJF AV ČR v Řeži. Fotografie této sestavy jsou na Obrázku 3.4. Testovaná součástka (dioda, scintilátor) je umístěna v černém kufru ochraňujícím od nežádoucího pozadí. Dále je k ní přiveden napěťový zdroj a osciloskop. Celé měření je ovládáno a analyzováno počítačem pomocí Statistického Softwaru "SEU Test DAQ Firmware v 0.06" [9], viz Obrázek 3.5.

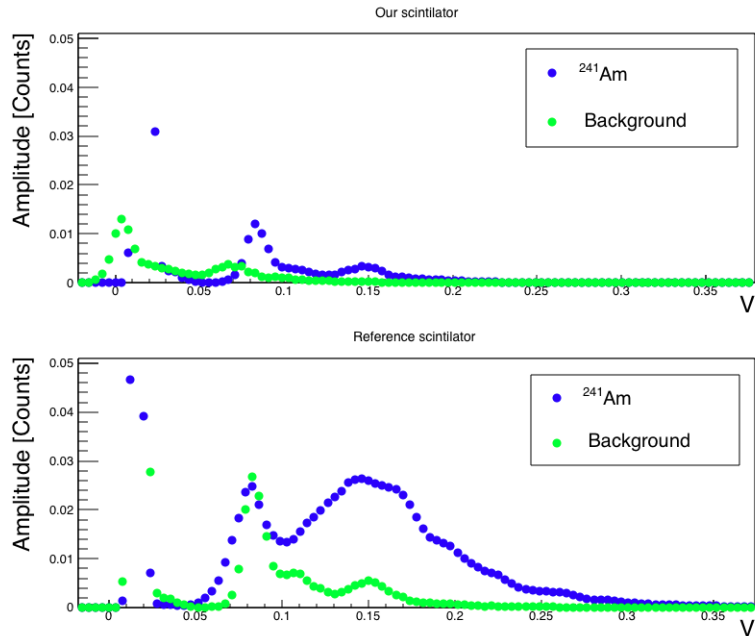


Obrázek 3.4: Vlevo: Rohde&Schwarz oscilloscope RTO 1024 [10]. Červená šipka ukazuje kufr pro testování. Vpravo: Zdroj napětí KEITHLEY.



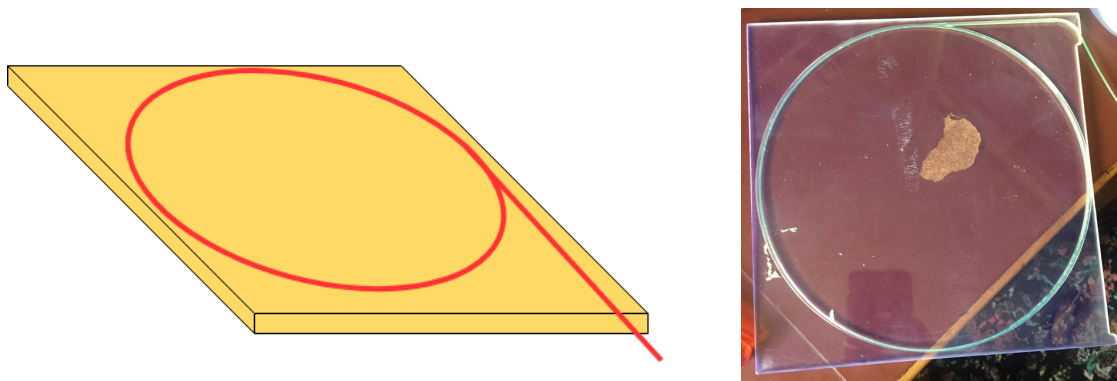
Obrázek 3.5: Statistický Software "SEU Test DAQ Firmware v 0.06" s voltampérovou charakteristikou testované diody.

Dále jsme analyzovali efektivitu sběru signálu ze scintilátoru. To jsme provedli pomocí zářiče ^{241}Am a nabráním statistiky s pozadím. Stejnou analýzu jsme provedli i pro referenční scintilátor, který se používá v Projectile Spectator Detector (PSD) [11], viz Obrázek 3.7 vpravo. Výsledky analýzy jsou na Obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Grafy závislosti amplitudy signálu na napětí. Nahoře: Závislost pro scintilátor NUVIA. Dole: Závislost pro referenční scintilátor.

Jak je vidět, odezva referenčního scintilátoru je lepší. Myslíme si, že je to kvůli odlišné geometrii umístění WLS vláken. V referenčním scintilátoru WLS vlákna jsou umístěna nikoliv na povrchu scintilátoru, ale ve speciálních výřezech (viz Obrázek 3.7 vlevo), což poskytuje efektivnější sběr světla ze scintilátoru a tím pádem i vyšší odezvu signálu.

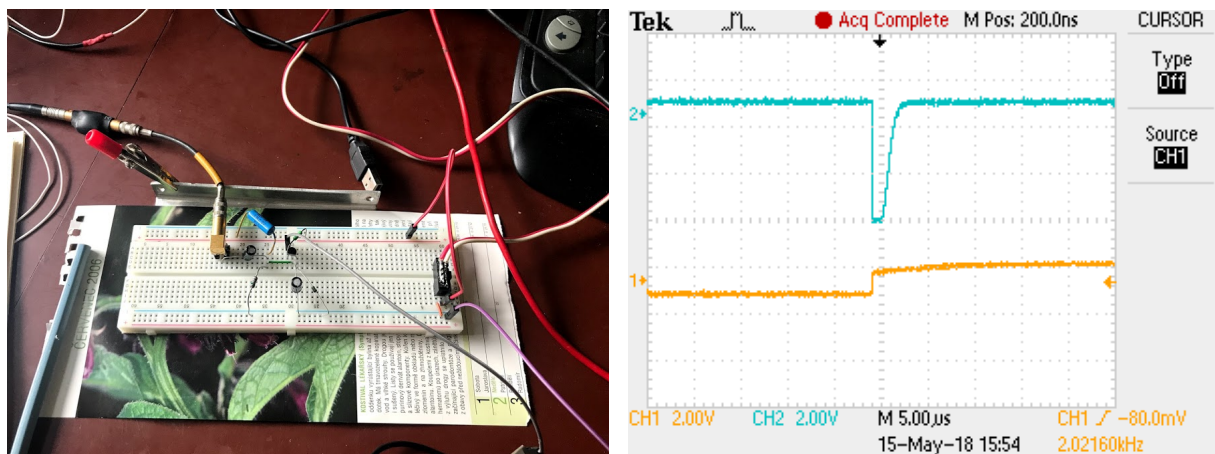


Obrázek 3.7: Vlevo: Návrh umístění WLS vláken ve scintilátoru. Vpravo: Referenční scintilátor.

3.3 Trigger

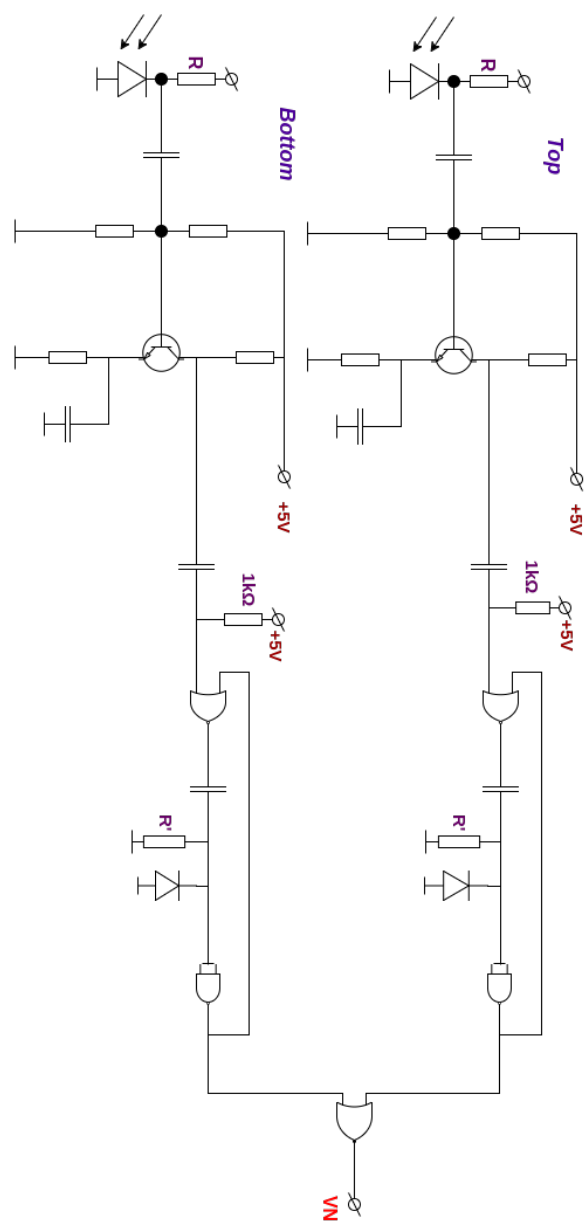
Na zpracování signálu z diody se musí použít logický obvod. Na začátku je potřeba zesílit signál z obou fotodiod, což realizuje tranzistorový zesilovač. Zesílený analogový signál je velice krátký. Aby porovnání signálu bylo možné, je třeba, aby se časové délky obou signálů překrývaly. Z toho důvodu a také z důvodu úzkých časových délek zesílených signálů, je nutné je prodloužit pomocí tzv. monostabilního klopného obvodu. Výsledné signály se pak porovnají v součtovém hradle a v případě shody bude poslán signál o velikosti 5 V do napájecího zdroje (viz Obrázek 3.8).

Jelikož výstupní napětí z diody je velmi malé (menší 1 V, viz Obrázek 3.6), potřebné zesílení pro další zpracování signálu by mělo být ≈ 100 násobné. To znamená, že je potřeba udělat kaskádu ze zesilovačů. Tohle je ale velice náročné pro tranzistorové zesilovače, protože je těžké určit konzistentní hodnoty jednotlivých částí schématu. Maximální námi dosažené zesílení bylo pětinasobné, viz Obrázek 3.8 vpravo. Proto bychom doporučovaly použít operační zesilovač, který je jednodušší na výpočet, sestavení kaskády a je méně ovlivněn změnami teplot, tlaků atd.



Obrázek 3.8: Vlevo: Tranzistorový zesilovač. Vpravo: Měření pětinasobně zesíleného signálu osciloskopem.

Sestavení našeho logického obvodu bylo velmi komplikované. Obvod byl velmi citlivý na nejmenší změny vnějších podmínek. Místo něj by šlo využít programmable logic device (PLD), ve kterém se dá jednoduše naprogramovat logický obvod. PLD je také portabilní a rychle zpracovává signál. Bohužel nám to napadlo udělat příliš pozdě.



Obrázek 3.9: Schéma zapojení. VN je výstupní napětí.

Kapitola 4

Napájecí zdroje

K napájení desek je potřeba zdroj vysokého napětí, který musí mít velmi rychlý náběh. Vhodným kandidátem se zdál býti Marxův zdroj vysokého napětí. Vhodnou úpravou napájení Marxova zdroje jsme měli být schopni vysoké napětí spouštět ve velmi krátkém čase.

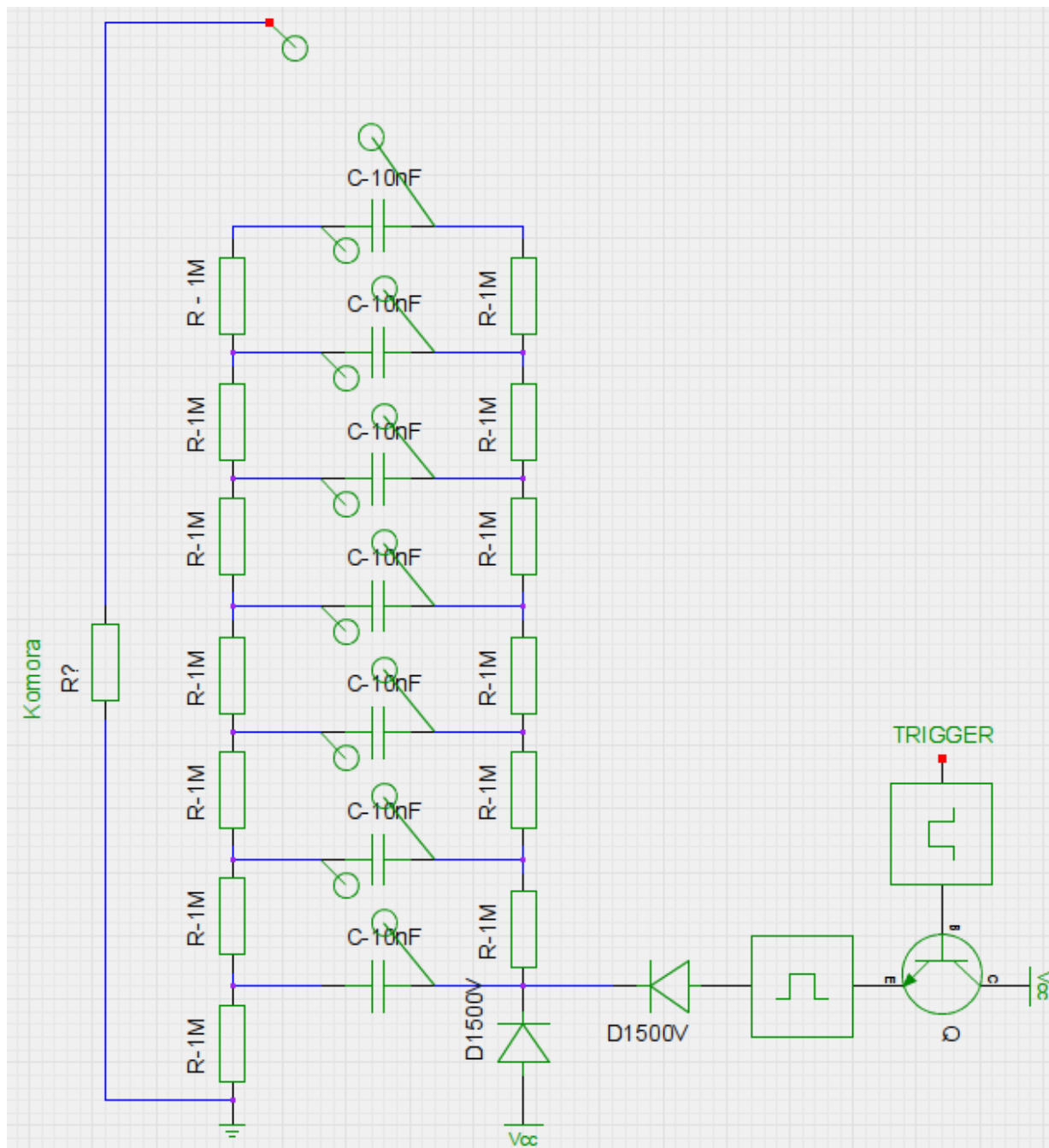
V sekci 4.1 je podrobněji popsána výroba Marxova zdroje včetně použitých materiálů. Následující sekce 4.2 popisuje experimentální sestavu používanou k testování maximálního napětí. Nakonec je vyhrazená sekce 4.3 shrnující potřebné součástky a úpravy k získání předpokládaného zdroje pro jiskrovou komoru.

4.1 Technické zpracování

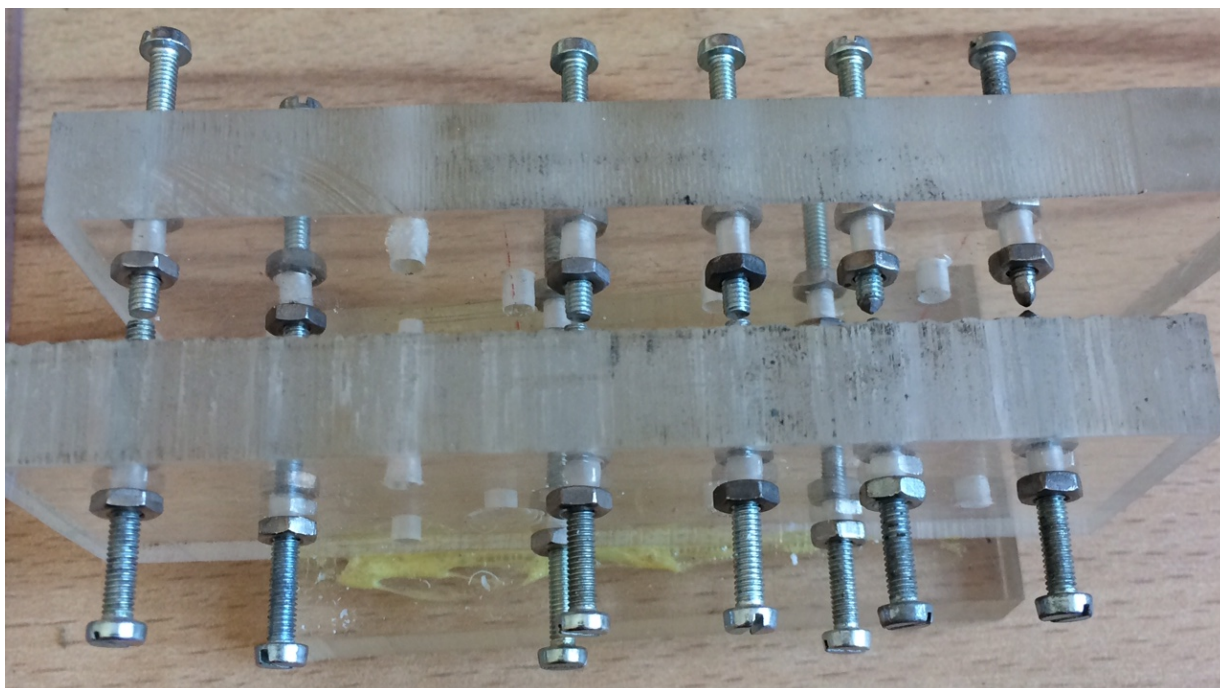
Námi postavený Marxův zdroj se skládal ze dvou částí. „Žebříku“ tvořeného kondenzátory a rezistory zapojených podle schématu na Obrázku 4.1 a U-profilem s řadou jiskřišť. Celkem 8 kondenzátorů (10 nF, 3kV) a 16 rezistorů (1 M Ω , 3 W) jsme pro lepší stabilitu přilepili pomocí tavné lepící pistole na obdélníkovou desku z plexiskla a spájeli je k sobě. Na ty konce, na které jsme přiváděli kladné napětí, jsme připájeli usměrňovací diody viz Obr. 4.3.

Sadu jiskřišť jsme vytvořili ze tří kusů plexiskel, šroubů a matek. Z plexiskla byl vytvořen U-profil. Do stran byly vyvrtány díry tak, aby bylo možné z každé strany prostrčit šroub. Vždy dva šrouby naproti sobě tvoří jedno jiskřiště. Po nastavení vhodné vzdálenosti jsme šrouby pak z každé strany uchytili pomocí matek viz Obr. 4.2. Tento způsob se ale neukázal jako velmi praktický, jelikož jsme vždy museli při změně vzdálenosti vypnout zdroj napětí a odpojit dané jiskřiště. Navíc vzdálenost jiskřiště nešla upravovat jemně. Několika šroubům jsme pro lepší rozložení náboje pomocí pilníku upravili konec do špičky, čímž jsme mohli přesněji nastavit první jiskřiště, a tedy i napětí při kterém nám jiskřiště probíjela. Sadu jiskřišť jsme potom k soustavě kondenzátorů a rezistorů připojili pomocí propojovacích kabelů s krokosvorkami. Následovalo testování parametrů, které je popsáno v sekci 4.2.

Po testování byl přidán tranzistor (IXGH6N170), který měl přijímat signál z trigrovacího



Obrázek 4.1: Schéma zapojení vysoko-napětového zdroje.



Obrázek 4.2: Postavené jiskřiště z plexiskla, šroubů a matic.

obvodu a spouštět tak průraz na jiskřištích. Při testování bylo zjištěno, že tranzistor nedokáže spouštět nedostatečně vysoké napětí a po dvou testech přestal tranzistor fungovat.

4.2 Testování vlastností

Výboje z postaveného Marxova zdroje měly předpokládanou amplitudu přibližně 12 kV s velmi krátkou dobou vybíjení. K přesnému měření je potřeba velmi drahých přístrojů, které jsme neměli k dispozici. Proto bylo potřeba vytvořit testovací obvod, u kterého by bylo možné měřit hodnotu napětí a časovou konstantu nepřímým měřením. K měření časové konstanty jsme použili osciloskop s velmi dobrým časovým rozlišením a ke snížení napětí jsme využili dělení napětí na sériově zapojených odporech. Tím jsme snížili napětí na dostatečně nízké. V průběhu výboje se ukázalo, že při vysokém napětí není odpor vodičů stálý, jelikož amplituda silně oscilovala. Časovou konstantu výboje jsme určili na $t = 10 \mu\text{s}$. K měření amplitudy napětí jsme využili nastavitelné jiskřiště s mikrometrickým šroubem a známou hodnotu dielektrické pevnosti vzduchu 3 kV/mm. Při velké vzdálenosti koncového jiskřiště (v tomto případě jiskřiště s mikrometrickým šroubem) se velmi často probily předcházející jiskřiště bez spuštění finálního výboje. Občas docházelo k průrazu na finálním jiskřišti až po třiceti spuštěních předcházejících jiskřišť. Z toho důvodu jsme začali měřit napětí na kondenzátorech a ukázalo se, že se kondenzátory nenabíjí na stejné napětí. Úbytky byly v řádu desítek procent. K snížení efektu tohoto jevu jsme změnili



Obrázek 4.3: Zapojení kondenzátorů a rezistorů na plexiskle, tvořící "žebřík".

schéma napájení – vstupní napětí jsme přiváděli do středu "žebříku". A nejspíše proto jsme naměřili jakožto největší vzdálenost posledního jiskřiště $l = (3.40 \pm 0.05)$ mm. Z toho vyplývá maximální dosažené napětí $U = 10.2$ kV. Toto byla uspokojivá hodnota, nicméně méně uspokojivá byla doba potřebná k průrazu. Tento fakt jsme chtěli vyřešit pomocí spouštěcího tranzistoru, který by přivedl průrazné napětí až po dostatečném nabití kondenzátorů.

Bohužel se ukázalo, že tranzistor je nevhodný, při použití 1700 V se nepovedlo vždy spustit průraz na jiskřištích. Je teď potřeba najít nové řešení tohoto problému.

4.3 Doporučení

Při sestavování a testování Marxova zdroje jsme udělali několik chyb, které považujeme za důležité, a chceme doporučit vhodnější postupy.

Pravděpodobně nejsložitější je vhodné nastavení jiskřišť. Proto je potřeba věnovat mnohem delší čas vytvoření návrhu jiskřiště. Náš návrh byl velmi provizorní a manipulace s jiskřišti byla náročná.

Dalším problémem bylo snižování napětí na kondenzátorech. Z toho pohledu je potřeba věnovat více času zkoušení různých součástek a materiálů, protože je velmi pravděpodobné, že i přes veškeré naše snahy se kondenzátory vybíjely právě skrze plexisklo.

Poslední doporučení se týká výběru tranzistoru. Doporučujeme použití tranzistoru s vyšší hodnotou maximálního napětí, jelikož je velmi jednoduché překročit napětí 1,7 kV. Nevýhodou pak bude spouštěcí čas a proto se domníváme, že by bylo lepší použít jiného spouštěcího prvku.

Kapitola 5

Závěr

Vnější konstrukce komory byla připravena k sestavení, ale z časových důvodů jsme nestihli finální sestavení uskutečnit. Vnitřní část konstrukce komory je sestavena a připravena pro testování jakmile bude vnější část konstrukce sestavena a utěsněna.

Jako plnicí plyn byl zvolen argon na základě vlastností a cenové dostupnosti. Připojení plynu bylo realizováno do stěny komory a těsnost tohoto připojení bylo otestováno. V tomto připojení je zavedena redukce tlaku plynu, neboť bez této redukce by mohlo dojít k poškození komory vysokým tlakem. Dále byl postup plnění komory plynem vypracován, avšak tento postup nemohl být otestován z důvodu pozdější sestavení konstrukce komory. Proto byly diskutovány některé předpokládané problémy a popsán postup pro jejich odstranění.

V průběhu sestavování námi navrženého schématu se ukázalo, že je složitě realizovatelné. Je něm příliš mnoho detailů a výpočet vhodných hodnot pro jednotlivé části obvodu není triviální ani pomoci simulaci v LTspice. Proto doporučujeme použít programmable logic device (PLD), ve kterém se dá jednoduše naprogramovat logický obvod. Bohužel z časových důvodů se nám nepodařilo tento návrh realizovat, protože provedení obvodu pomocí PLD nás napadlo až v září. Maximální, námi dosažené, zesílení pomocí tranzistorového zesilovače je 5 krát. Po studiu sběru fotonu ze scintilátoru bylo zjištěno, že efektivita sběru je příliš malá. Tento fakt vede k malému outputu, což by se ideálně mohlo vyřešit zesilováním signálu 100 krát. Tohoto zesílení bychom ale mohli dosáhnout jenom pomocí kaskády tranzistorových zesilovačů. Výpočet a realizace takové kaskády se zdá příliš komplikované, jednodušší by bylo použití operačního zesilovače.

Marxův zdroj se nám podařilo postavit a zprovoznit. Potíže nastaly při testování trigrování, kdy byl zničen jediný tranzistor. Z toho důvodu jsme byli pouze schopni ověřit maximální dosažitelné napětí. Složitým problémem se ukázalo být i nastavení jiskřišť.

Literatura

- [1] C. Patrignani et al. Review of Particle Physics. *Chin. Phys.*, C40(10):100001, 2016.
- [2] PPRA kolaborace Praha 2016/2017. Conceptual design report - jiskrová komora. 2017. URL https://physics.fjfi.cvut.cz/files/predmety/02PPRA/Docs/CDR_2016-17.pdf.
- [3] H. H. Wittenberg. *Gas Tube Design*. Lancaster, 1962. URL http://www.g3ynh.info/disch_tube/Wittenberg_gas_tubes.pdf.
- [4] J. Collins. Construction of a Prototype Spark Chamber. *ArXiv e-prints*, October 2010. URL <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010arXiv1010.4010C>.
- [5] NUVIA. *NuDET PLASTIC Plastic Scintillation Detectors*. URL <http://www.nuvia.cz/ke-stazeni/en/products/radiometric-systems/nudet-plastic.pdf>. [online 5.12.2017].
- [6] Loctite. Loctite 3494—technický list. URL <https://proprumysl.cz/soubory/236/Loctite-3494-technicky-list.PDF>. [online 14.09.2018].
- [7] Kuraray. *Plastic Scintillating Fibers*. URL <http://kuraraypsf.jp/pdf/all.pdf>. [online 3.2.2018].
- [8] Hamamatsu. Short wavelength type apd, si apd s5343. URL <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/212375/HAMAMATSU/S5343.html>. [online 19.12.2017].
- [9] V.Kushpil. Seu test daq firmware v 0.06.
- [10] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. *R&S RTO Digital Oscilloscope, User Manual*. URL https://www.naic.edu/~phil/hardware/oscilloscopes/RTO_UserManual_en.pdf. [online 12.9.2018].
- [11] CERN. Projectile spectator detector. URL <http://shine.web.cern.ch/content/projectile-spectator-detector-psd>. [online 16.9.2018].