

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření charakteristik SiPM pro experiment DUNE

Autor: Eva Fialová
Vedoucí: RNDr. Jan Smolík, Ph.D.
Akademický rok: 2020/2021



Katedra: KDAIZ

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Eva Fialová

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Název práce: Měření charakteristik SiPM pro experiment DUNE
(česky)

Název práce: Measurement of SiPM characteristics for DUNE experiment
(anglicky)

Pokyny pro vypracování:

1. Stručně popište experiment DUNE, jeho fyzikální cíle a detekční aparaturu.
2. Vypracujte stručný přehled detektorů scintilačního světla.
3. Popište princip fungování a vlastnosti polovodičových detektorů typu SiPM.
4. Proved'te měření vybraných charakteristik SiPM při pokojové teplotě a při teplotě kapalného dusíku. Výsledky zpracujte.

Doporučená literatura:

- [1] ABI, B., R. ACCIARRI, M.A. ACERO, et al. Volume IV. The DUNE far detector single-phase technology. *Journal of Instrumentation*. 2020, **15**(08), T08010-T08010. ISSN 1748-0221. DOI:10.1088/1748-0221/15/08/T08010.
- [2] ACERBI, Fabio, Stefano DAVINI, Alessandro FERRI, et al. Cryogenic Characterization of FBK HD Near-UV Sensitive SiPMs. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2017, **64**(2), 521-526. ISSN 0018-9383. DOI:10.1109/TED.2016.2641586.
- [3] GERNDT, Josef, Petr PRŮŠA. *Detektory ionizujícího záření*. ČVUT Praha. 2011.

Jméno a pracoviště vedoucího bakalářské práce:

RNDr. Jan Smolík, Ph.D.
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření
Břehová 7
115 19 Praha 1

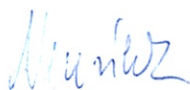
Jméno a pracoviště konzultanta bakalářské práce:

RNDr. Jaroslav Zálešák, Ph.D.
Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.
Na Slovance 2
182 21 Praha 8

Datum zadání bakalářské práce: 15.10.2020

Termín odevzdání bakalářské práce: 7.7.2021

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.



garant oboru



vedoucí katedry


děkan

V Praze dne 15.10.2020



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze

.....

Eva Fialová

Poděkování

Děkuji RNDr. Janu Smolíkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

Dále bych chtěla poděkovat RNDr. Jaroslavu Zálešákovi, Ph.D a Ing. Josefu Zuklínovi za cenné rady, které tuto práci obohatily.

Eva Fialová

Název práce: **Měření charakteristik SiPM pro experiment DUNE**

Autor: Eva Fialová

Obor: Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Jan Smolík, Ph.D., FJFI ČVUT v Praze, Katedra dozimetrie a aplikace ionizujícího záření

Abstrakt: Křemíkový fotonásobič SiPM je typ fotodetektoru, který bude sbírat vytvořené scintilační fotony ve vzdáleném detektoru neutrinového experimentu DUNE. V práci je stručně popsán experiment DUNE a nejpoužívanější druhy fotodetektorů. Dále je v práci uveden detailnější popis SiPM. V experimentální části práce jsou popsána měření volt-ampérových charakteristik SiPM, metody určení průrazného napětí a zhasacího odporu a jsou zde uvedeny zpracované výsledky provedených měření při pokojové teplotě a při teplotě kapalného dusíku.

Klíčová slova: fotodetektory, SiPM, volt-ampérová charakteristika, zhasací odpor, průrazné napětí, neutrina

Title: **Measurement of SiPM characteristics for DUNE experiment**

Author: Eva Fialová

Abstract: The Silicon Photomultiplier SiPM is a type of photodetector that will collect scintilating photons in the Far Detector of Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE). This thesis briefly describes the DUNE experiment and the most used types of photodectors. A more detailed description of SiPMs is presented. The experimental part of the thesis describes measurements of volt-ampere characteristics of SiPMs, methods for determination of breakdown voltage and quenching resistance and the processed results of measurements made at room temperature and at liquid nitrogen are given here.

Key words: photodetectors, SiPM, volt-ampere characteristic, quenching resistance, breakdown voltage, neutrinos

Obsah

Úvod	12
1 Experiment DUNE	13
1.1 Fyzikální program	13
1.2 Detektory a podpůrná zařízení DUNE	13
1.2.1 Produkce neutrinového svazku	14
1.2.2 Vzdálený detektor	14
1.2.3 Blízký detektor	16
2 Fotodetektory	20
2.1 Základní veličiny	20
2.2 Druhy fotodetektorů	24
2.2.1 Fotonásobiče	24
2.2.2 Fotodiody	26
2.2.3 Hybridní fotonásobiče	31
2.3 Výběr vhodného fotodetektoru	32
3 Křemíkový fotonásobič SiPM	36
3.1 Provozní principy a charakteristiky	36
3.2 Vliv teploty na provoz SiPM	40
4 Testování SiPM pro experiment DUNE	46
4.1 Popis provedených testů	47
4.1.1 Aparatura	47
4.1.2 Měření průrazného napětí	48
4.1.3 Měření zášecího odporu	50
4.2 Naměřené výsledky	52
4.2.1 První fáze - 25 SiPMs	53
4.2.2 Druhá fáze - 120 SiPMs	54

5 Závěr a diskuze výsledků	65
A Příloha	69

Úvod

Neutrína jsou pro nás jedny z nejzáhadnějších a nejméně interagujících částic ve Vesmíru. Pokud bychom byli schopni získat bližší informace o jejich vlastnostech, mohli bychom nalézt odpovědi na doposud nezodpovězené důležité otázky týkající se vývoje Vesmíru, jako jsou: Jaký je původ hmoty ve Vesmíru? Jaký existuje vztah mezi všemi známými přírodními silami? Jak vypadá zrod černé díry? A jaký je vlastně původ naší existence? Právě Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) si klade za cíl nalézt odpovědi na tyto složité otázky.

DUNE je mezinárodní neutrinový experiment zaštitěný Fermiho národní laboratoří, USA. Bude se skládat ze tří hlavních částí, jimiž jsou zdroj neutrinového svazku, blízký detektor a vzdálený detektor. V první kapitole této bakalářské práce je stručně popsán fyzikální program a ony tři hlavní části experimentu DUNE.

Citlivý objem vzdáleného detektoru bude plněn kapalným argonem, který je výborný scintilátor. Ten bude udržován na teplotě přibližně $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při interakci nabitých částic ve scintilátoru vznikají scintilační fotony. Ty je potřeba sebrat na fotocitlivém prvku - fotodetektoru. Ve vzdáleném fotodetektoru budou jako fotosenzitivní prvky použity křemíkové fotonásobiče SiPM. Druhá kapitola této bakalářské práce se proto věnuje stručnému popisu nejpoužívanějších fotodetektorů. Dále jsou detailněji popsány charakteristiky křemíkových fotonásobičů a vliv teploty na jejich provoz.

V poslední kapitole této práce jsou popsána měření volt-ampérových charakteristik SiPM pro vzdálený detektor experimentu DUNE, která byla prováděna na Fyzikálním ústavu AV ČR. Volt-ampérové charakteristiky byly měřeny při pokojové teplotě k ověření údajů uvedených výrobcem a v kapalném dusíku, jehož teplota je podobná teplotě kapalného argonu. Měření v kapalném dusíku jsou důležitá z toho důvodu, že SiPMs běžně nejsou vyráběny pro použití při tak nízké teplotě, proto je potřeba znát, jak takto nízká teplota ovlivňuje jejich charakteristiky.

1. Experiment DUNE

Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) je mezinárodní neutrinový experiment. V této kapitole bude stručně popsán jeho fyzikální program a detektory.

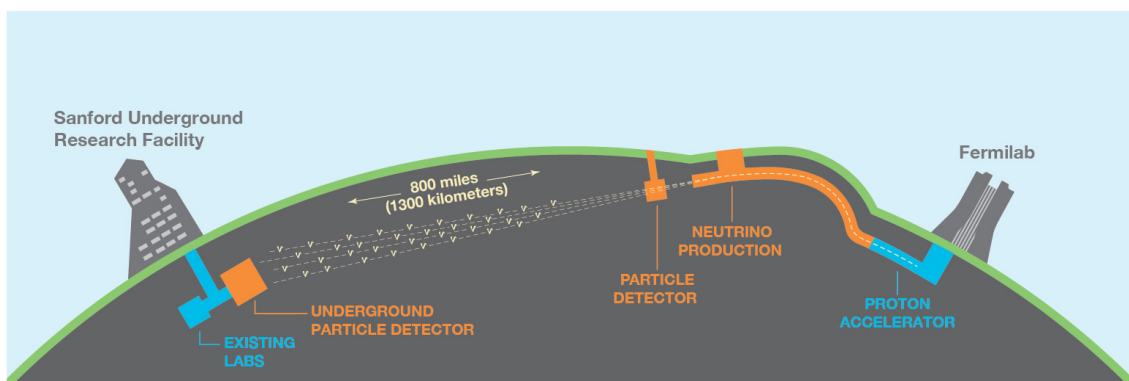
1.1 Fyzikální program

Proč převažuje hmota nad antihmotou? Jaká je dynamika neutrin emitovaných při výbuchu supernov? Dochází k rozpadu protonů? Toto jsou klíčové otázky, jejichž zodpovězením bychom mohli pochopit rané stádium vývoje Vesmíru, jeho současný stav a jeho budoucí vývoj. Právě experiment DUNE se zaměřuje na jejich zodpovězení.

Neutrína se nachází ve třech stavech (vůních) a mohou mezi sebou oscilovat z jedné vůně na druhou. Objev oscilace neutrin indikoval nenulový rozdíl jejich hmotností a ukázal na existenci teorie mimo rámec standardního modelu [13]. Experiment DUNE přispěje ke zpřesnění znalostí této teorie. Hlavní potenciální přínosy experimentu jsou vysvětlení nepoměru mezi hmotou a antihmotou, což je způsobeno narušením nábojově-prostorové symetrie (CPV), zpřesnění stanovení rozdílu hmotností neutrin a jejich oscilačních parametrů. Kromě neutrin produkovaných urychleným svazkem protonů, bude DUNE schopen také shromažďovat a analyzovat neutrína pocházející z výbuchu supernov v Mléčné dráze, díky čemuž bychom mohli mít vzácnou příležitost nahlédnout do nitra nově vytvořené neutronové hvězdy, či pozorovat zrod černé díry. Teorie velkého sjednocení předpokládá určitou střední dobu života protonů. Vzhledem k možnostem experimentu by tato doba na něm mohla být ověřena.

1.2 Detektory a podpůrná zařízení DUNE

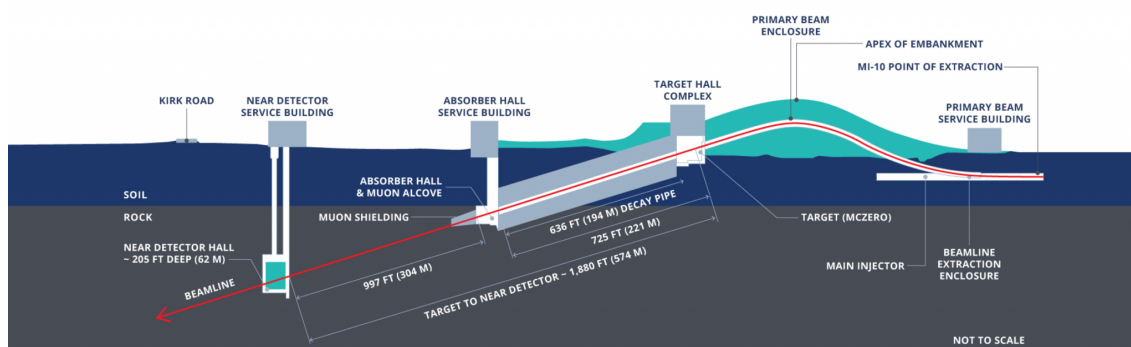
Hostitelskou organizací experimentu DUNE je Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), sídlící ve státě Illinois, USA. Sestává ze tří hlavních částí, jimiž jsou zdroj neutrinového svazku, vzdálený detektor (Far Detector FD), jež se nachází v Sanford Underground Research Facility (SURF) v Jižní Dakotě, USA a z blízkého detektoru (Near Detector ND) instalovaného v blízkosti neutrinového zdroje. Na obrázku 1.1 je zobrazeno rozložení těchto částí.



Obrázek 1.1: Schéma rozložení experimentu DUNE (převzato z [13])

1.2.1 Produkce neutrinového svazku

Nízký účinný průřez neutrin způsobuje, že interagují pouze velmi zřídka. Z toho důvodu jich bude potřeba ohromné množství, aby jich DUNE mohl zachytit dostatečný počet. Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) má na starost produkci svazku neutrin. Proces jeho produkce začne v urychlovači zvaném PIP-II, který bude dodávat svazek protonů o výkonu od 1 do 1,2 MW [13]. Tento svazek bude urychlen urychlovačem zvaným „Main Injector“ a následně zaměřen na válcový grafitový terč. Energie protonů ve svazku se bude pohybovat od 60 do 120 GeV [13]. Srážkou protonového svazku s terčem vznikne sekundární svazek z kladných a záporných pionů a dalších částic. Magnety zvané „Horns“ zaměří kladně nabyté piony do tenkého svazku. Ty se pak samovolně rozpadnou na kladné miony a neutrina. Nově vzniklý svazek složený z mionů a neutrin narazí do beton-ocelového bloku, který absorbuje miony. Tím vznikne neutrinový svazek. Přepólováním magnetů mohou být namísto kladných pionů zaměřeny záporné piony, čímž vznikne svazek antineutrin. Na obrázku 1.2 je zobrazeno schéma produkce neutrinového svazku.



Obrázek 1.2: Produkce svazku neutrin a hala s blízkým detektorem DUNE (převzato z [13])

1.2.2 Vzdálený detektor

Vzdálený detektor se bude nacházet v jeskyni vzdálené 1300 km od blízkého detektoru, 1,5 km pod zemí [13]. Toto umístění umožní odstínit kosmické záření a jiné

zemské vlivy. Detektor bude složen ze čtyř LArTPC (Liquid Argon Time Projection Chamber) detektorových modulů, z nichž každý bude obsahovat přibližně 10 kt kapalného argonu (LAr) udržovaného na teplotě přibližně $-184\text{ }^{\circ}\text{C}$. Detekční modul představuje citlivý objem detekční soustavy. Každý LArTPC modul bude vsazen do kryostatu o rozměrech 15,1 m (š) x 14 m (v) x 62 m (d) a celkové hmotnosti LAr přibližně 17,5 kt.

TPC je typ dráhového detektoru částic, který používá kombinaci elektrických polí a snadno ionizovatelného citlivého objemu k trojrozměrné rekonstrukci trajektorie, nebo interakce částice [12]. Nabitě částice při průchodu TPC ionizují atomy citlivého objemu podél své trajektorie. Vzniklé elektrony driftují k anodové rovině, kde jsou detekovány. Touto detekcí jsou získány ale pouze dvě ze tří potřebných souřadnic k trojrozměrné rekonstrukci. Třetí souřadnice se určí z rekonstrukce času driftu elektronu citlivým objemem. V případě LArTPC se jako citlivý objem používá kapalný argon, který je zároveň dobrým scintilátorem. Scintilační světlo se používá ke stanovení času přiletu částice.

V současné době jsou vyvíjeny dvě technologie LArTPC: jednofázová (single-phase SP), ve které budou všechny detekční prvky uvnitř kryostatu ponořeny v kapalném argonu a dvoufázová (dual-phase DP), v níž některé detekční prvky budou pracovat ve vrstvě plynného argonu nad kapalinou. Obě tyto technologie budou podrobněji popsány dále v textu. Aktivní oblast LArTPC je definována elektrodami udržujícími homogenní elektrické pole (tzv. „field cage“).

Argon emituje fotony o vlnové délce 126,8 nm [13]. Tyto fotony budou po posunu do oblasti vlnových délek viditelného světla sbírány fotodetektory. Porovnáním času vzniku oněch fotonů s časem jejich dopadu na fotodetektor lze zrekonstruovat událost v souřadnici driftu částice.

Single-phase modul

Na obrázku 1.3 je zobrazen operační princip modulu single-phase (SP) LArTPC. Nabitě částice při průchodu TPC komorou ionizují molekuly argonu. Vzniklé ionizované elektrony driftují vlivem elektrického pole k anodovým rovinám. SP modul se bude skládat ze čtyř driftových oblastí, přičemž každá oblast bude vystavena elektrickému poli o gradientu 500 V/cm [13].

SP modul bude tvořen třemi sestavami anodových rovin (APA) [13]. Každá anodová rovina bude 6 m vysoká a 2,3 m široká. Jedna sestava se bude skládat z 50 anodových rovin (2 APA vysoká a 25 APA široká). Každá APA bude složena ze tří vrstev hliníkových drátů tvořících mřížku, viz obr. 1.3. Dráty v rovinách U a V budou navlečeny pod úhly $35,7^{\circ}$ a v rovině X budou navlečeny svisle. Toto uspořádání drátů bylo zvoleno z toho důvodu, aby byla snížena nejednoznačnost rekonstrukce události. Relativní napětí mezi jednotlivými vrstvami bude nastaveno tak, aby byla zajištěna transparentnost vůči elektronům, které driftují v prvních dvou vrstvách U a V. Poslední vrstva X bude shromažďovat driftující elektrony, což povede ke vzniku unipolárního signálu (ve vrstvách U a V vzniká bipolární signál).

Fotony budou sbírány v zařízeních zvaných X-ARAPUCA¹, které budou umístěny mezi anodovými rovinami. Jedna X-ARAPUCA se skládá z vrstev dichronického fil-

¹„Arapuca“ je původně jihoamerická ptačí past, zde je tento název použit jako analogie přístroje určeného k zachytu fotonů.

tru a posunovače vlnových délek, které posouvají dopadající scintilační světlo do viditelné oblasti a to je sbíráno na křemíkových fotonásobičích. Na obr. 1.4 je zobrazeno složení jedné X-ARAPUCA buňky. Jak je vidět z obrázku, jedna X-ARAPUCA bude obsahovat šest křemíkových fotonásobičů [13].

Dual-phase modul

Operační princip modulu dual-phase (DP) je zobrazen na obr. 1.5, je velmi podobný operačnímu principu SP modulu [13]. Nabité částice procházející aktivní oblastí LArTPC ionizují molekuly argonu a produkují tak scintilační světlo a ionizované elektrony. Vzniklé elektrony driftují vertikálně k anodám (což je rozdíl oproti SP, kde elektrony driftují v horizontálním směru), kde zanecahjí svoji energii. Scintilační světlo je detekováno ve fotonásobičích.

Ionizované elektrony driftují k extrakční mřížce, která se nachází těsně pod rozhraním kapalina-plyn, viz obr. 1.5. Po dosažení této mřížky je silnější elektrické pole vytáhne do plynné části modulu. V této části se elektrony srazí s molekulami plynu v oblastech s vysokou intenzitou pole a dojde tak k lavinovému zesílení náboje. Tento náboj bude poté sebrán na 2D anodě složené ze dvou sad pozlacených měděných pásků, které poskytnou x-ové a y-ové souřadnice události. Řada fotonásobičů, pokrytá posunovačem vlnové délky, bude umístěna pod katodou k záznamu času vzniku a pulsní charakteristiky dopadajícího světla

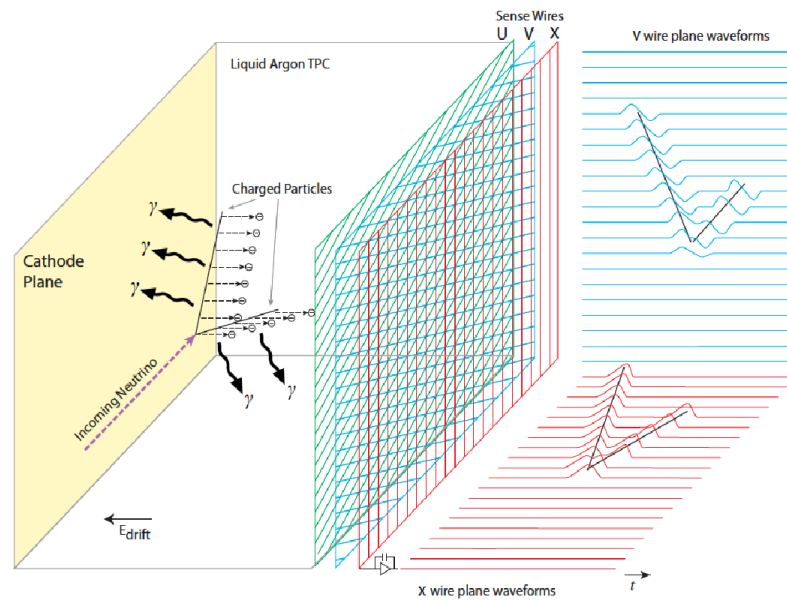
Kryostat

Vzdálený detektor bude sestávat ze čtyř kryostatů, každý kryostat bude obsahovat jeden ze čtyř modulů vzdáleného detektoru DUNE [13]. Kryostaty budou mít duální membránový systém (viz obr. 5), tzn. že v izolační vrstvě bude usazena vložka z vlnité nerezové oceli vtěsnaná mezi hliníkové plechy. Více vrstev bude udržovat argon v chladu a na stálém místě.

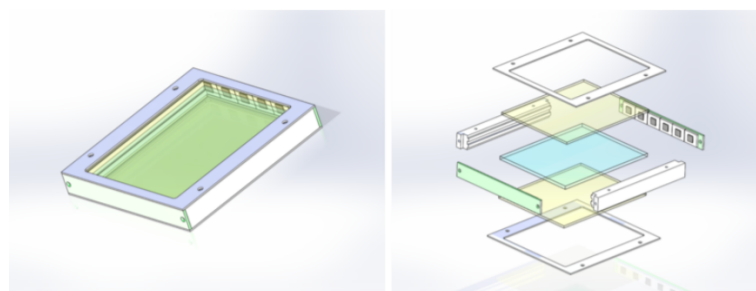
1.2.3 Blízký detektor

Účelem blízkého detektoru je omezení systematických chyb experimentu, měření počátečních ještě neoscilujících neutrin a zkoumání energetických spekter elektronových neutrin a odpovídajících antineutrin. Tato měření v porovnání s měřeními na vzdáleném detektoru pomohou rozklíčovat různé energeticky závislé efekty, jež modulují spektrum svazku a díky nim bude nejspíše možné snížit systematické nejistoty na úroveň potřebnou k zpřesnění nábojově-prostorové symetrie. Další důležitou úlohou blízkého detektoru bude zkoumání interakcí neutrin jak s plynným, tak s kapalným argonem s vysokou přesností.

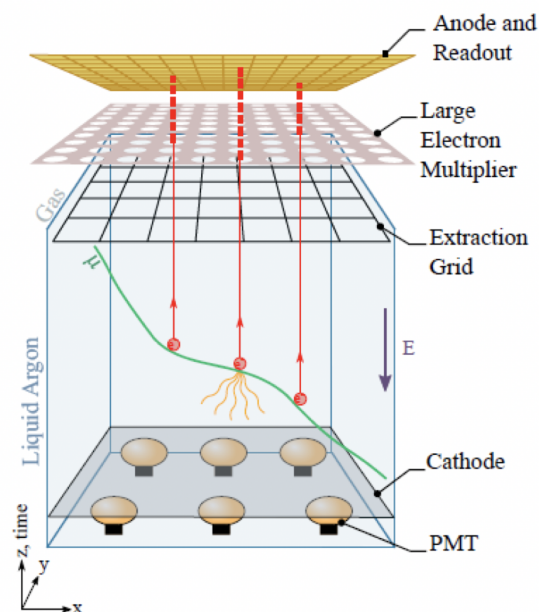
Blízký detektor se bude nacházet 574 m od terče (vznik svazku neutrin), přibližně v 60 m pod zemí [13]. V současné době se předpokládá, že se bude skládat ze tří hlavních částí, jimiž jsou LArTPC zvaná ArgonCube, TPC plněná plynným argonem o vysokém tlaku, obklopená elektromagnetickým kalorimetrem, společně zvané jako multiúčelový detektor (MPD) a monitor svazku umístěný v jeho směru, tzv. System for on-Axis Neutrino Detection (SAND). Složení blízkého detektoru je zobrazeno na obr. 1.7. Blízký detektor se stále vyvíjí, proto se jeho složení může ještě změnit.



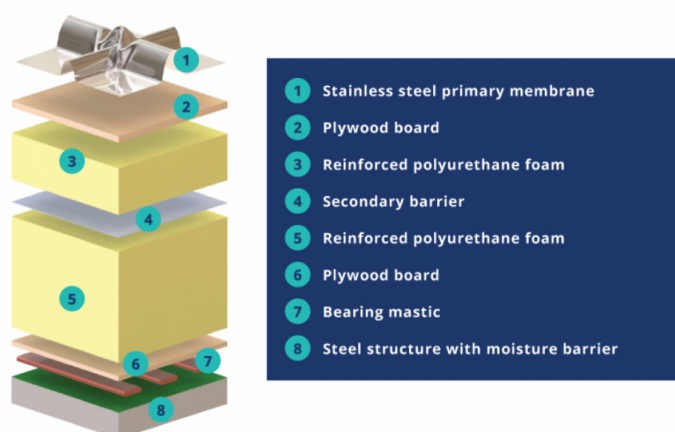
Obrázek 1.3: Operační princip modulu single-phase (převzato z [13])



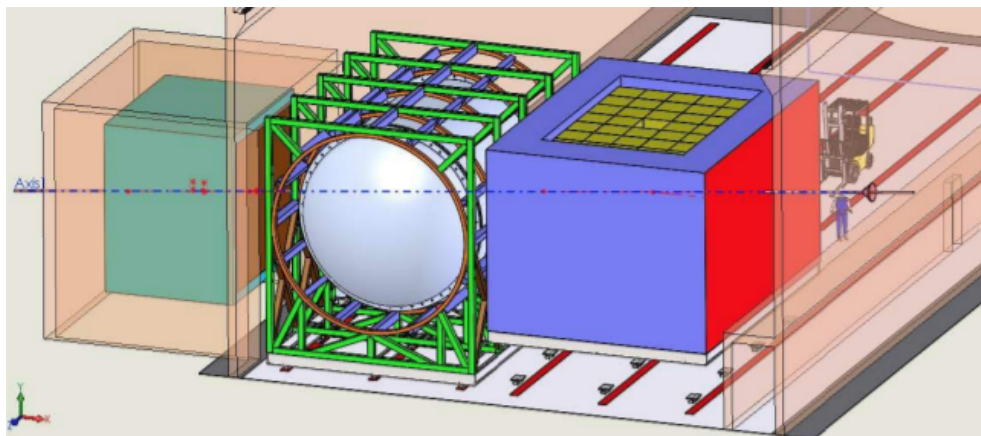
Obrázek 1.4: V levé části je zobrazena jedna X-ARAPUCA buňka, v pravé části jsou zobrazeny jednotlivé části této buňky, kde modrý plát představuje posunovač vlnových délek a žluté pláty jsou dichromické filtry, černé čtverečky představují jednotlivé křemíkové fotonásobiče. (převzato z [13])



Obrázek 1.5: Operační princip modulu dual-phase (převzato z [13])



Obrázek 1.6: Schéma duálního membránového systému oddělujícího kryostaty (převzato z [13])



Obrázek 1.7: Složení blízkého detektoru. Osu svazku představuje modrá čerchovaná čára přicházející ve směru zprava. Vpravo je umístěna LarTPC, uprostřed MPD a nalevo se nachází monitor svazku. (převzato z [13])

2. Fotodetektory

Energie ionizujícího záření, která je absorbována ve scintilačních/Čerenkovových detektorech, se projeví emisí fotonů, jejichž vlnová délka obvykle náleží do viditelné či modré oblasti světla. Tento jev se nazývá luminiscence. S objevem těchto detektorů bylo potřeba vynalézt vhodný fotocitlivý prvek, který by emitované fotony sbíral a díky fotoelektrickému jevu je převáděl na elektrický signál. K tomuto účelu byli vyrobeny fotodetektory.

Fotony ze scintilačních/Čerenkovových detektorů je třeba přenést na fotocitlivý prvek a na něm je sebrat s co nejmenšími ztrátami [3]. U scintilátorů je potřeba pokrýt jejich vrstvu reflektujícím materiálem, aby byly fotony sebrány beze ztrát, jelikož vyletují z místa svého vzniku izotropně. U Čerenkovových detektorů to není potřeba, jelikož fotony vyletují z místa svého vzniku v určitém směru. Fotodetektor bývá nejčastěji připojen k podstavě scintilačního/Čerenkova detektoru optickým kontaktem. Indexy lomu scintilačního/Čerenkova detektoru a k němu připojenému fotodetektoru by si měly být velmi blízké, aby nedocházelo ke ztrátě fotonů. Na jejich rozhraní se ale mohou tvořit vzduchové bubliny, proto se mezi rozhraní vkládají silikonové oleje, silikonové gely, či silikonové podložky. Kromě vhodného indexu lomu je dalším důležitým požadavkem na materiál optického kontaktu dobrá (nejlépe konstantní) propustnost emitovaných fotonů v celé oblasti jejich vlnových délek.

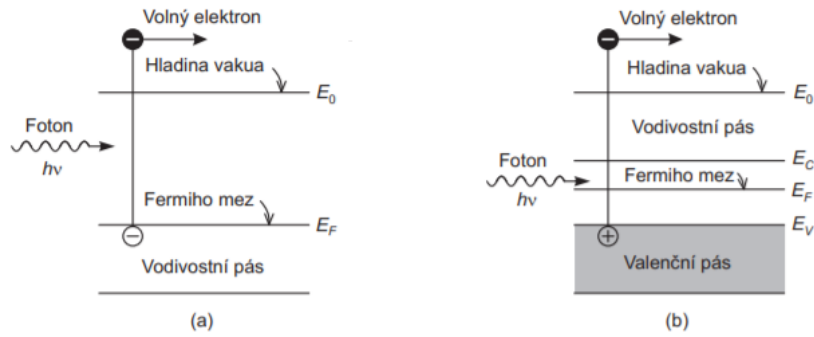
Fotoelektrický jev

Fotodetektory fungují na principu fotoelektrického jevu. Podle typu fotodetektoru v nich probíhá buď vnější, nebo vnitřní fotoelektrický jev. Tento jev je absorpční proces, při kterém dopadající foton předá veškerou svou energii vázanému atomárnímu elektronu a uvolní ho z atomu. Takto uvolněný elektron je nazýván fotoelektron.

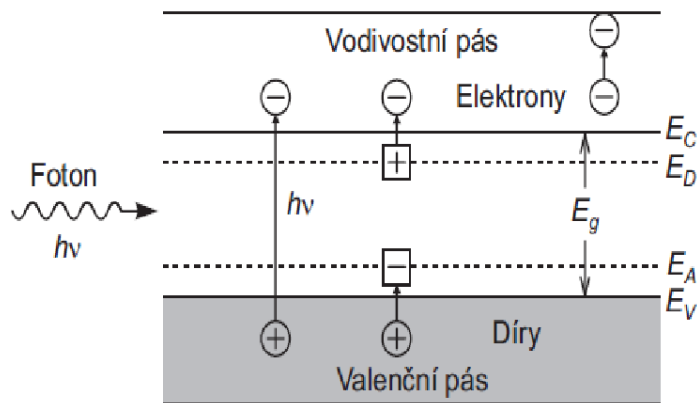
Vnější a vnitřní fotoelektrický jev se odlišují místem vzniku fotoelektronu [15]. Vnější fotoelektrický jev probíhá na povrchu materiálu, vzniklé fotony jsou pak uvolňovány z místa svého vzniku do okolí. Využívá se ve fotonásobičích. Schéma vnějšího fotoelektrického jevu je zobrazeno na obr. 2.1. U vnitřního fotoelektrického jevu zůstávají vzniklé fotoelektrony v materiálu a způsobují v něm vnitřní elektronové přechody, ty zvyšují vodivost materiálu. Schéma vnitřního fotoelektrického jevu je zobrazeno na obr. 2.2. Využívá se ve fotodiodách.

2.1 Základní veličiny

K popisu vlastností a porovnání jednotlivých typů fotodetektorů je potřeba definovat jejich základní veličiny. Bude tomu tak učiněno v této kapitole.

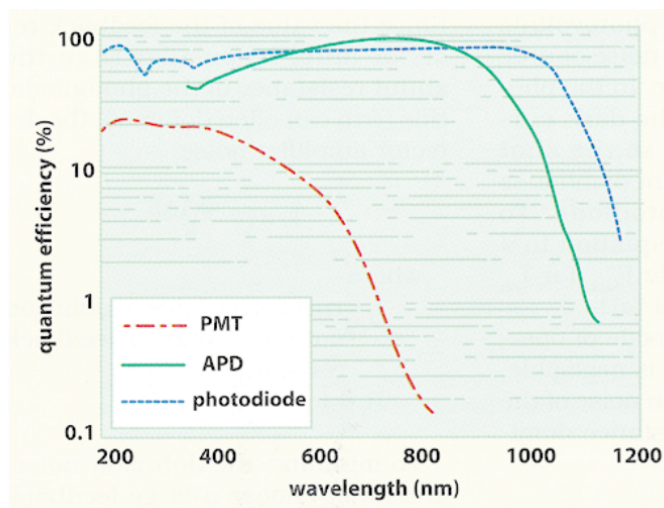


Obrázek 2.1: Vnější fotoelektronová emise a) z kovu, b) z polovodiče (převzato z [15])



Obrázek 2.2: Vnitřní fotoelektrický jev (převzato z [15])

Kvantová účinnost $\eta(\lambda)$ (%) - je definována jako poměr počtu fotonů generovaných nosičů náboje za jednotku času, které přispívají k výstupnímu signálu, ku počtu fotonů dopadajících na světlocitlivou část fotodetektoru za jednotku času [14]. Vyjadřuje tedy pravděpodobnost, že foton dopadající na fotocitlivý prvek vygeneruje jeden elektron-děrový pár. Kvantová účinnost (η) závisí na vlnové délce dopadajícího světla λ . Je-li například vlnová délka dopadajícího světla příliš krátká, dochází k jejímu poklesu, jelikož dojde k absorpci většiny fotonů u povrchu fotodetektoru, kde generované nosiče náboje rekombinují dříve, než mohou být odvedeny do obvodu [15]. Závislost $\eta(\lambda)$ na vlnové délce pro různé typy fotodetektorů je zobrazena na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Typická kvantová účinnost různých druhů fotodetektorů v závislosti na vlnové délce (převzato z Hamamatsu Photonics)

Fotonová detekční účinnost PDE - definuje se jako podíl fotonů které dopadly na fotodetektor ku počtu vzniklých fotoelektronů [14]. Vyjadřuje tedy zlomek přichozících fotonů, které přispívají k výstupnímu signálu. Je přímo úměrná kvantové účinnosti.

Spektrální zářivá citlivost $E(\lambda)$ (A/W) - účinnost, se kterou fotodetektor převádí dopadající záření o jisté vlnové délce na proud. Mezi ní a kvantovou účinností η platí empirický vztah [3]:

$$E(\lambda) \doteq \lambda \cdot \eta(\lambda) \cdot 0,806 \cdot 10^{-5} \quad (2.1)$$

Zisk - je dán podílem výstupního proudu fotodetektoru ku proudu, jež je přímo produkovaný dopadajícími fotony.

Energetická rozlišovací schopnost (eV) - je měřítkem přesnosti stanovení absorbované energie [3]. Pro její určení uvažujeme, že na detektor dopadá monoenergetické záření. Vlivem statistických fluktuací procesů v detektoru a šumu vyhodnocovacího zařízení nemá amplitudové spektrum tvar delta funkce, ale blíží se Gaussově křivce. Zavádí se veličina **FWHM**, která udává plnou šířku v polovině maxima této křivky, ta určuje energetickou rozlišovací schopnost detektoru.

Náběžná doba impulsu (s) - doba časového spektra odezvy fotodetektoru měřená mezi 10 % a 90 % maxima signálu [3].

Šířka frekvenčního pásma fotodetektoru B (Hz) - je definována jako $B = \frac{1}{\Delta t}$, kde Δt je náběžná doba impulsu [15]. Udává rozsah frekvencí, při kterých je detektor schopen pracovat.

Doba průchodu signálu (transit time) (s) - poloha maxima časového spektra je posunuta o dobu průchodu signálu systémem. Tato doba se nazývá transit time [3].

Časové rozlišení (transit time jitter) (s) - udává časovou rozlišovací schopnost v polovině maxima časového spektra [3]. Je obdobou FWHM při amplitudové analýze.

Šum N - šumem jsou nazývány náhodné fluktuace měřeného signálu [6]. Lze ho charakterizovat pomocí histogramu detekovaných pulsů různých výšek (ty závisí na počtu fotonů), tento histogram může být přibližně fitován Poissonovým rozdělením. Poissonovo rozdělení pro šum má pak následující tvar:

$$P_x(k) = \frac{m^k \cdot e^{-m}}{k} \quad (2.2)$$

kde m je očekávaný počet detekovaných fotonů a je roven střední hodnotě a směrodatná odchylka je definována jako odmocnina z m . Šum, jehož chování lze popsat Poissonovým rozdělením, se nazývá *shot* šum. Šum může být způsoben např. termálním pohybem nosičů ve fotodetektoru i v obvodových součástkách vznikem nadbytečných elektron-děrových párů, které později rekombinují a dalších.

Signál S - vstupním signálem je označováno množství světla, které je potřeba detekovat. Jeho spektrální distribuce se nejčastěji udává ve formě maxima jeho vlnové délky [6]. Množství vstupního signálu může být měřeno buď ve watttech, nebo v počtu fotonů.

Poměr signál/šum (S/N) - základní definice poměru S/N je dána pomocí vztahu:

$$S/N = \frac{S_{input} \cdot PDE}{\sqrt{N_{fotonshot}^2 + N_{darkshot}^2 + N_{output}^2}} \quad (2.3)$$

kde N_{foton} je šum způsobený fotony, N_{dark} šum způsobený temnými impulzy a N_{output} je šum vzniklý na výstupu generovaný zesilovačem [6].

Ekvivalentní šumový výkon NEP (W/ $\sqrt{\text{Hz}}$) - při měření, či při výběru vhodného fotodetektoru je šum důležitou vlastností fotodetektoru. Jednou z možností, jak ho kvantifikovat je pomocí veličiny NEP. Definicí veličiny NEP je mnoho, jednou z nich je tato: NEP udává výkon vstupního signálu, jehož výsledkem je, že poměr S/N je roven jedné při šířce frekvenčního pásma rovné 1 Hz [5]. Jinými slovy, NEP vyjadřuje míru nejslabšího optického signálu, který lze detekovat.

Linearita odezvy fotodetektoru - stanovuje se jako rozsah hodnot, při kterém fotodetektor zachovává lineární vztah mezi vstupním zářením a jeho výstupní odezvou [6].

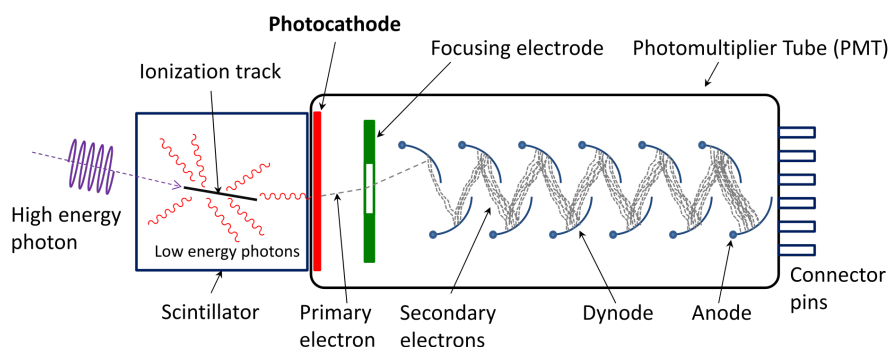
Dynamický rozsah fotodetektoru - je dán poměrem nejvyššího a nejnižšího množství vstupního signálu, při kterém si detektor zachovává lineární odezvu [6]. Spodní limit je dán šumem fotodetektoru, horní limit je dán nasycením fotodetektoru.

2.2 Druhy fotodetektorů

2.2.1 Fotonásobiče

Fotonásobiče (anglicky Photo Multipliers PM) jsou velmi hojně využívané fotodetektory [3]. Převádějí scintilační/Čerenkovy fotony na impulsní elektrický signál, při měření dávkového příkonu ho převádějí na proudový. Detekují fotony ve velmi široké oblasti vlnových délek světla. Některé druhy mají i schopnost detekce jednotlivých fotonů. Používají se ve scintilační technice, fotometrii, laserové fyzice, astrofyzice, kalorimetrii a dalších. Jejich výroba je poměrně technologicky náročná, z toho důvodu se parametry typově stejných fotonásobičů liší.

Fotonásobiče se nejčastěji konstruují ve formě vakuové trubice složené z fotokatody, dynodového násobícího systému a anody [3]. Úkolem fotokatody je konvertování fotonů, které na ní dopadly, na fotoelektrony. Dynodový násobící systém násobí počet vzniklých elektronů, ty se sbírají na anodě. Schéma fotonásobiče je zobrazeno na obr. 2.4. Fotonásobič je běžně provozován při napětích řádově kV [16].



Obrázek 2.4: Schéma fotonásobiče se scintilátorem (převzato z [16])

Výstupní proud fotonásobiče je závislý na intenzitě a časových charakteristikách dopadajícího světla. Různé typy fotonásobičů se odlišují velikostí, strukturou dynod, spektrální odezvou, maximálním ziskem, časovými charakteristikami, odolností k magnetickým polím a dalšími. Na obr. 2.5 jsou některé typy fotonásobičů zobrazeny.

Fotokatoda

Princip činnosti fotokatody je založen na vnějším fotoelektrickém jevu. Energie dopadajících fotonů musí být větší nebo rovna vazebné energii elektronů materiálu fotokatody.



Obrázek 2.5: Různé typy fotonásobičů (převzato z Hamamatsu Photonics)

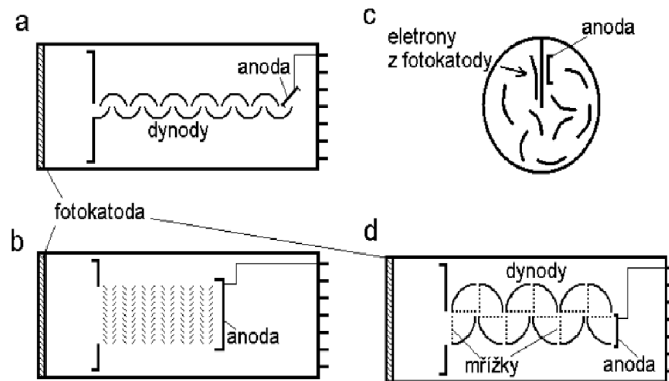
U fotokatod určujeme dlouhovlnnou hranici spektrální charakteristiky, která představuje mezní vlnovou délku světla, při níž přestává fotoelektrická emise [3]. Dále se ještě určuje krátkovlnná mez spektrální charakteristiky. Ta je určena spektrální propustností vstupního okénka fotonásobiče a má vliv na jeho spektrální odezvu.

Nejčastěji používané materiály fotokatod jsou: Sb-Cs (citlivá v UV a viditelné oblasti), Cs - K -Sb a Cs - Rb - Sb (vhodné pro scintilační techniku, mají větší odezvu v modré oblasti světla a nižší šum), Na - K - Sb (schopna provozu až do teplot 150 °C díky malé termické emisi, vhodná pro měření malých světelných intenzit) [3]. Nejčastěji je fotokatoda napařena přímo na okénko fotonásobiče, tzv. čelní konstrukce. Dále mohou být fotokatody napařeny na stěny fotonásobiče. Toho se ale příliš nevyužívá (pouze pro velké toky fotonů), jelikož sběr fotonů je zde málo účinný.

Elektronový násobící systém

Elektronový násobící systém slouží k zesílení proudu z fotokatody [3]. K onomu zesílení využívá jevu sekundární emise. Sběr elektronů na první dynodě by měl být téměř 100 % účinný a homogenní. Potenciál mezi ostatními dynodami dále urychluje vytvořené elektrony. Každý z těchto elektronů při dopadu na další dynodu vyrazí průměrně δ nových elektronů. δ je lineárně závislé na V^s , kde V je potenciál, kterým byl urychlen primární elektron a s je součinitel sekundární emise. Opakováním tohoto procesu lze docílit zisku řádově až 10^8 .

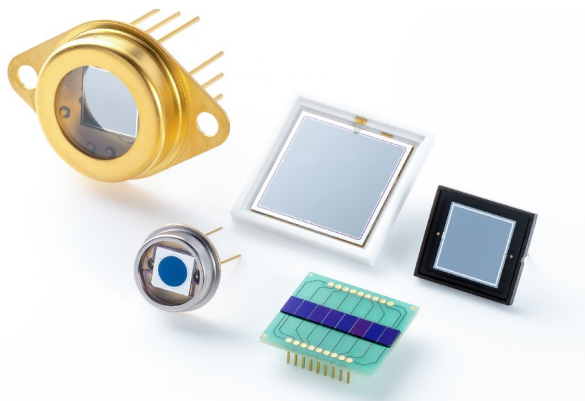
Elektronový násobící systém se obvykle skládá z 10 - 14 dynod, které jsou nejčastěji potaženy povlakovými vrstvami SbCs a BeO [3]. Dynody jsou uspořádány tak, aby k úniku elektronů ze systému docházelo co nejméně. Různá uspořádání dynod mají vždy jiné výhodné vlastnosti, kterými mohou být např. malé rozměry, rychlá odezva, odolnost k magnetickým polím a další. Na obr. 2.6 jsou zobrazena jejich čtyři základní geometrická uspořádání. Vytvořené elektrony jsou z poslední dynody sbírány na anodě.



Obrázek 2.6: Schéma uspořádání struktur dynodových systémů. a) lineární, b) kompaktní, c) žaluziové, d) krabičkové (převzato z [3])

2.2.2 Fotodiody

Dalším typem fotodetektorů jsou polovodičové fotodiody (anglicky Photo Diodes PD). Oproti fotonásobičům mají určité nevýhody, jako jsou např. malá citlivá plocha, malý výstupní signál a k němu relativně velký šum [3]. I přes tyto nevýhody se ale hojně využívají. Jejich přednostmi jsou malé napájecí napětí, kompaktnost, mechanická odolnost, odolnost k magnetickým polím a nižší cena. Mezi dva hlavní druhy fotodiody se řadí **konvenční fotodiody** a **lavinové fotodiody**. Různé druhy fotodiody jsou zobrazeny na obr. 2.7.



Obrázek 2.7: Různé typy fotodiody (převzato z Hamamatsu Photonics)

PN a PIN přechod

Fotodiody jsou obdobou polovodičových křemíkových diod, jejichž struktura je založena na PN přechodu. Proto bude v následujících odstavcích vysvětlen jeho princip.

PN přechod se vytvoří dopováním jedné části intrinsického¹ krystalu buď prvky atomů V. skupiny, tzv. donory, nebo prvky III. skupiny, tzv. akceptory [3]. Křemík krystalizuje v kubické soustavě a díky tomu všechny čtyři jeho valenční elektrony zprostředkují kovalentní vazbu. Při dopování atomy V. skupiny zprostředkují čtyři z pěti valenčních elektronů kovalentní vazbu a pátý valenční elektron zůstane volný. Ten termicky přejde do vodivostního pásu, čímž vznikne kladně nabitý iont ale nevzniká díra. Majoritními nosiči náboje se pak stávají elektrony. Dopováním atomy III. skupiny zprostředkují všechny tři valenční elektrony kovalentní vazbu a čtvrtá vazba zůstane neobsazena. Neobsazená vazba bude zaplněna elektronem z okolí, čímž vznikne záporný iont a volná díra, ale nevznikne vodivostní elektron. Majoritními nosiči náboje se v tomto případě stávají díry. Takto vzniklé oblasti P (anoda) a N (katoda) se označují jako extrinsické. Mají mnohem menší odpor oproti intrinsickému krystalu. Dopování může být prováděno pomocí iontové implantace, nebo difúze.

K detekci ionizujícího záření se využívá PN přechodu zapojeného v závěrném směru. Přes přechod při tomto zapojení procházejí pouze minoritní nosiče náboje, jejichž koncentrace je velmi nízká. Zapojením PN přechodu v závěrném směru vniká tzv. vyprázdňená oblast, která představuje citlivý objem detektoru.

Šířka vyprázdňené vrstvy má vliv na fotosenzitivitu a frekvenční odezvu diody. Se zvětšující se šířkou roste její citlivost na delší vlnové délky světla, snižuje se kapacita, zlepšuje se frekvenční odezva, ale také se bohužel zvyšuje počet temných impulsů [6].

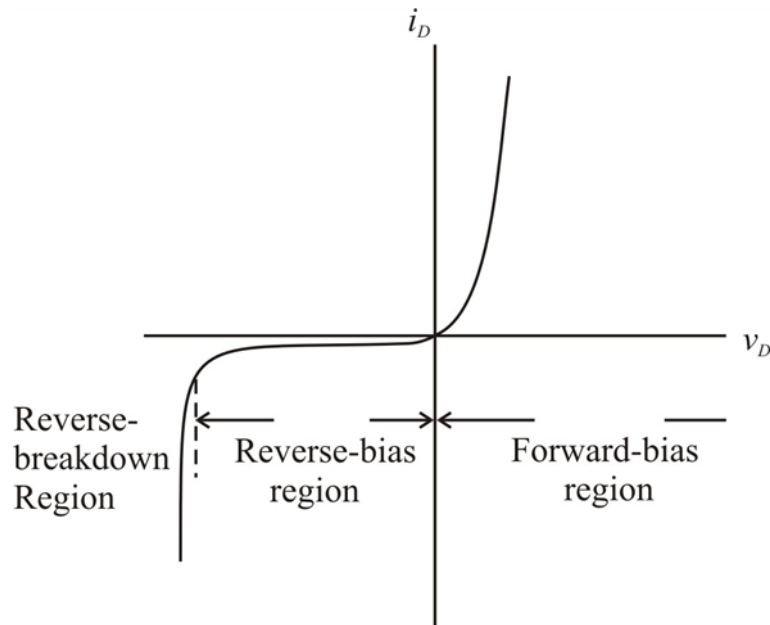
Frekvenční odezvu a šířku frekvenčního pásma lze ještě zlepšit přidáním intrinsického krystalu křemíku mezi PN přechod, což vede ke vzniku PIN diody. Přidáním této vnitřní oblasti se diodě zmenší kapacita na jednotku její plochy, a tím se zvýší její šířka frekvenčního pásma a frekvenční odezva [6]. Díky těmto vlastnostem jsou PIN diody vhodné pro vysokofrekvenční pulzní aplikace. Jejich zisk nabývá jedné, proto jsou vhodné pro detekci relativně silných světelných signálů.

Pokud není fotodioda ozářena, má její volt-ampérová (V-I) charakteristika stejný průběh jako u běžné diody, viz obr. 2.8. Po ozáření dochází vlivem vnitřního fotoelektrického jevu k nárůstu elektrického proudu v závěrném směru. Fotodioda je schopna reagovat velmi rychle na změny osvětlení (řádově 10^{-6} - 10^{-9} s) [6]. PIN fotodioda je schopna reagovat na změnu osvětlení ještě rychleji [2].

Konvenční fotodiody

Konvenční fotodiody jsou obdobou křemíkových polovodičových detektorů [3]. V konvenčních fotodiodách nedochází k zesílení a znásobení elektron-děrových párů, proto výstupní signál není nijak velký. Se zvětšující se plochou konvenčních fotodiod dochází k nárůstu jejich šumu. Z tohoto důvodu je velikost jejich plochy omezena na max. 1 cm^2 . Jejich obvyklá tloušťka se pohybuje v rozmezí 300 - 500 μm . Hlavními zdroji šumu jsou jejich kapacita a nenulový proud protékající při zapojení v závěrném směru, který má negativní vliv na rozlišovací schopnosti fotodiod. Rozlišovací schopnost lze zlepšit jejich chlazením (dojde k poklesu proudu tekoucím v závěrném

¹Intrinsická oblast je taková oblast, ve které je ustálena rovnováha mezi počtem nosičů náboje.



Obrázek 2.8: VA charakteristika neozářené diody

směru).

Konvenční fotodiody provozované v proudovém režimu se využívají ve výpočetní tomografii.

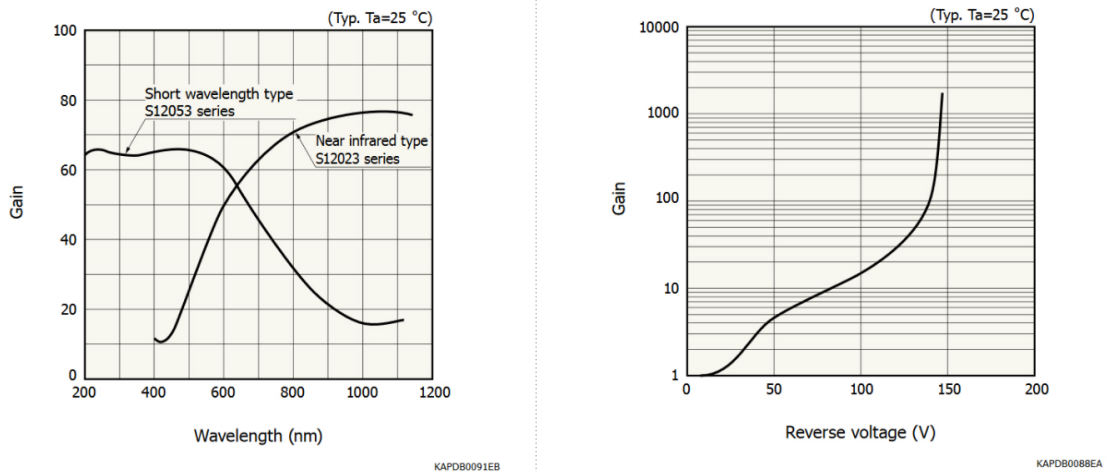
Lavinové fotodiody

V lavinových fotodiódách (anglicky Avalanche Photo Diodes APD) dochází k násobení počtu nosičů náboje tzv. lavinovým procesem, při němž se driftující nosiče náboje množí způsobem připomínajícím lavinu [6]. Lavina může nastat, pouze pokud je elektrické pole natolik silné, že se v krystalu vyskytnou dostatečně energetické nosiče náboje schopné ionizace atomů krystalické mřížky. Ionizací uvolní alespoň jeden další elektron-děrový pár při každém nárazu. Hlavní výhodou lavinového procesu je zesílení původního signálu na takovou úroveň, která je schopna překonat šum odečítacího mechanismu. Nosiče náboje se v lavině množí náhodně, díky čemuž dochází k fluktuacím šíření energie v lavině a kolísá celkový vnitřní zisk APD.

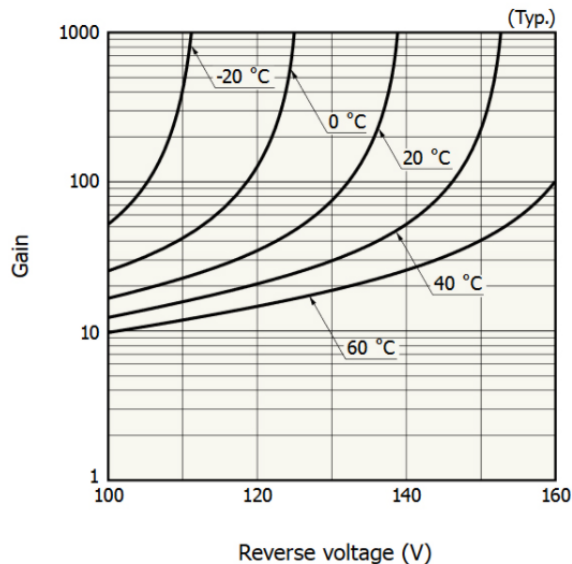
Celkový zisk APD závisí na vlnové délce dopadajícího světla, zvyšuje se se závěrným napětím a klesá s teplotou [6]. Pokles způsobují zvýšené vibrace fononů², díky nim dochází k častějším kolizím nosičů náboje v lavině s atomy, a nosiče tak ztrácejí více své kinetické energie. Všechny tyto závislosti jsou zobrazené na obrázcích 2.9 a 2.10.

Lavinovou fotodiodu lze zkonstruovat ve dvou strukturách: buď N-na-P, nebo P-na-N [6]. Tyto dvě struktury se liší svým ziskem v závislosti na vlnových délkách dopadajícího světla. Struktura N-na-P má větší zisk a je lépe fotocitlivá na delší vlnové délky. Naproti tomu struktura P-na-N dosahuje vyššího zisku a lepší fotocitlivosti na kratší vlnové délky.

²Fonon je kvazičástice šířící vibrační kvantum v krystalové mřížce.



Obrázek 2.9: Vpravo závislost zisku APD na vlnové délce dopadajícího světla. Vlevo závislost zisku APD na velikosti závěrného napětí (převzato z [6])

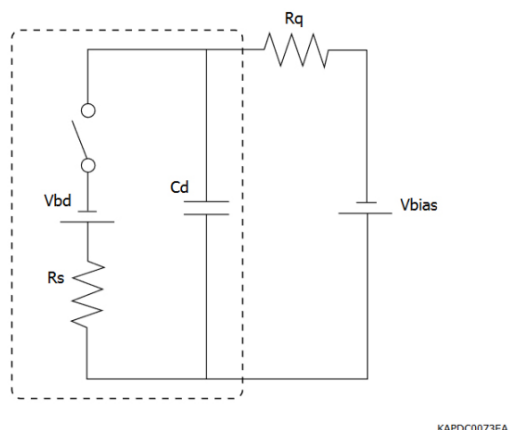


Obrázek 2.10: Závislost zisku APD na teplotě (převzato z [6])

Lavinové fotodiody lze kromě běžného režimu provozovat také v průrazném režimu, kdy závěrné napětí je vyšší než průrazné napětí [3]. Tento režim je označován jako Geigerův. Výsledný zisk lavinové fotodiody v Geigerově režimu nezávisí na počátečním počtu fotonů na ni dopadajících, což z ní dělá tzv. digitální fotodetektor. Jeho odezva je binární, tzn. že má schopnost určit pouze zda byl detekován signál nebo ne.

Obvod lavinové fotodiody je schematicky tvořen paralelní kombinací kondenzátoru se sériovou kombinací spínače, zdroje napětí a odporu, viz obr. 2.11 [6]. Dojde-li k absorpci fotonu, vytvoří se pár nosičů náboje elektron-díra, přičemž jeden z těchto nosičů spustí lavinu. V okamžiku spuštění laviny se začne vybíjet kondenzátor. Po ukončení laviny se kondenzátor začne opět nabíjet, tato doba se nazývá doba zota-

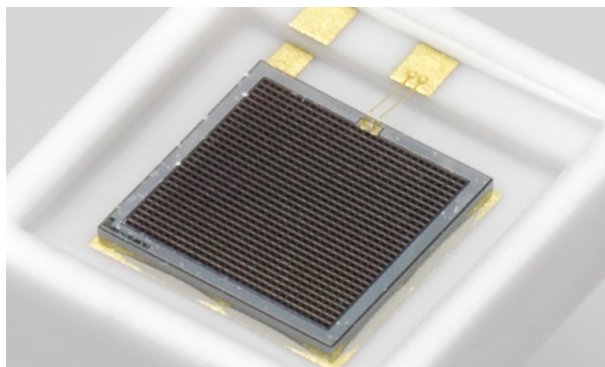
vení. Po tomto časový interval není lavinová fotodioda schopna detekovat přicházející impulzy.



Obrázek 2.11: Obvod APD v Geigerově režimu (převzato z [6])

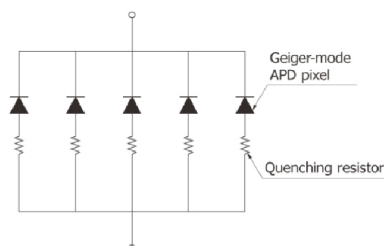
Provozováním APD v Geigerově režimu je dosahováno velmi vysokých hodnot jejího zisku, řádově $10^5 - 10^6$ [6]. Toho se využívá v aplikacích, kde se pracuje s nízkými intenzitami světla. K tomuto účelu byly vyvinuty speciální lavinové fotodiody pracující v Geigerově režimu (GAPD). Jejich nevýhodou je však znemožnění detekce během doby zotavení a nelineární odezva. Tyto nedostatky daly za vznik křemíkovým fotonásobičům.

Křemíkové fotonásobiče



Obrázek 2.12: Křemíkový fotonásobič (převzato z Hamamatsu Photonics)

Křemíkový fotonásobič (anglicky Silicon Photo Multiplier SiPM), někdy je též označován jako MPPC (Multi-Pixel Photon Counter), se skládá z mnoha paralelně zapojených pixelů, viz obr. 2.12. Pixel je tvořen lavinovou fotodioudou pracující v Geigerově režimu a zhasécím rezistorem, viz obr. 2.13. Stejně velké pixely bývají naskládány do tvaru obdélníku. Velikost jednotlivých pixelů se pohybuje v rozmezí 10 - 100 μm a jejich počet se může pohybovat v řádu stovek až desítek tisíc [14].



Obrázek 2.13: Struktura SiPM (Převzato z Hamamatsu Photonics)

Každý pixel generuje při dopadu fotonu pulz se stejnou amplitudou, tudíž při dopadu n fotonů současně bude výsledná amplituda signálu rovna výšce n superponovaných pulzů. Každý jednotlivý pixel je ale schopen vydat pouze jeden impuls i v případě, že na něj dopadne více fotonů současně.

Při zvýšení provozního napětí dochází ke zvýšení elektrického pole uvnitř fotodetektoru a zlepšuje se tím jeho zisk, fotonová detekční účinnost a jeho časové rozlišení [14]. Zároveň se tím ale snižuje poměr S/N. Napájecí napětí se obvykle pohybuje mezi 20 - 100 V.

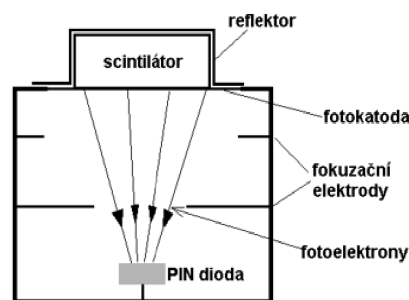
SiPMs mají širokou oblast využití v závislosti na vlnových délkách světla [6]. Často se používají např. v částicové fyzice, pozitronové emisní tomografii, nukleární medicíně a dalších. Jejich výhodami jsou například odolnost k magnetickým polím, nižší provozní napětí, nižší cena a další. Některými nevýhodami jsou naopak menší aktivní oblast, vyšší šum a teplotní závislost.

Volt-ampérové charakteristiky SiPMs jsem zkoumala v praktické části této bakalářské práce, proto bude o SiPMs ještě podrobněji hovořeno v následující kapitole.

2.2.3 Hybridní fotonásobiče

Hybridní fotonásobiče (HPMT) se poprvé objevily v průběhu 90. let 20. století [3]. Jsou kombinací fotonásobiče a křemíkové PIN diody. Fungují na následujícím principu: emitované fotony dopadají na fotokatodu a vyrážejí z ní fotoelektrony o energii 10 - 15 keV, ty jsou následně fokusovány elektrickým polem a poté dopadají na křemíkovou diodu. Každý fotoelektron vytváří asi 3000 - 5000 elektron-děrových párů, které jsou sbírány na diodě. Vzniká tak elektrický signál. Schéma HPMT je zobrazeno na obr. 2.14.

Ve srovnání s fotonásobiči mají HPMT menší výstupní signál, lepší energetickou rozlišovací schopnost a uplatňuje se u nich menší vliv změny napětí na zesílení [3]. Je-li HPMT vystaven velmi malým zábleskům světla, pak ve výstupním spektru můžeme pozorovat píky odpovídající dopadu až 14 elektronů, zatímco u běžných fotonásobičů nelze očekávat výsledek lepší nežli 1,2 a 3 píky odpovídající fotoelektro-



Obrázek 2.14: Schéma hybridního fotonásobiče spojeného se scintilátorem (převzato z [3])

novým ekvivalentům³. Dalšími výhodami jsou menší požadavky na stabilitu zdroje napětí oproti běžným fotonásobičům a vynikající časové vlastnosti (lze dosáhnout rozlišovací doby až 100 ps).

2.3 Výběr vhodného fotodetektoru

Při výběru vhodného fotodetektoru se ohlížíme na čtyři základní atributy detekovaného světla a to konkrétně na spektrální složení, intenzitu a na časovou a prostorovou charakteristiku [9]. Dalším důležitým kritériem při výběru vhodného fotodetektoru je samozřejmě také jeho cena. V této kapitole budou mezi sebou porovnány charakteristiky fotonásobičů, fotodiod, lavinových fotodiod a křemíkových fotonásobičů.

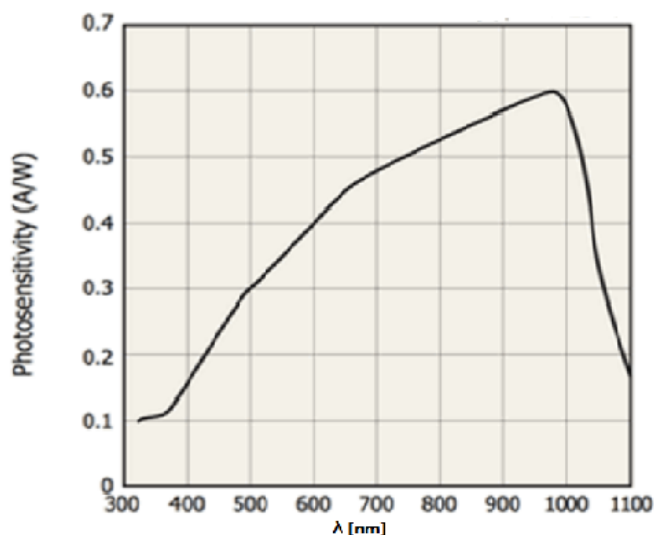
Charakteristiky	PMT	PD	APD	SiPM
Spektrální odezva (nm)	115 - 1700	190 - 13000	190 - 1700	320 - 900
Pík QE (η) (%)	< 40	< 90	< 90	< 40 (PDE)
Aktivní oblast (mm ²)	< 12000	< 100	< 100	< 10
Zisk (μ)	105 - 106	1	< 100	105 - 106
NEP ($\frac{W}{\sqrt{Hz}}$)	> $2 \cdot 10^{-17}$	> $6 \cdot 10^{-16}$	> $1 \cdot 10^{-15}$	> $6 \cdot 10^{-16}$
Náběžná doba impulzu (ns)	> 0,15	> 0,23	> 0,35	> 1
Šířka frekvenčního pásma (GHz)	< 2	< 1,5	< 1	NA
Časové rozlišení (ns)	> 0,05	NA	> 0,2	> 0,2

Tabulka 2.1: Hodnoty charakteristik pro dané fotodetektory (převzato z [9])

³Jeden fotoelektronový ekvivalent odpovídá velikosti výstupního impulzu způsobeného jedním fotoelektronem

Výběr na základě vlnové délky

V prvním kroku při výběru vhodného fotodetektoru je nutné porovnat, zda spektrum pozorovaného světla koresponduje se spektrální odezvou fotodetektoru [9]. K tomu slouží veličina kvantová účinnost, nebo případně spektrální zářivá citlivost daného fotodetektoru. Tyto veličiny jsou většinou výrobcem udávány ve formě grafu, viz obr. 2.15.



Obrázek 2.15: Závislost spektrální zářivé citlivosti na vlnové délce PIN fotodiody (převzato z [9])

V prvním řádku tabulky 2.1 je porovnaná spektrální odezva pro dané fotodetektory. Z tabulky lze pozorovat, že žádný z daných fotodetektorů není fotocitlivý na vlnovou délku $\lambda < 115$ nm. Nejširší spektrální odezvu mají podle tabulky 2.1 fotodiody, ty jsou citlivé až do infračervené oblasti. V této oblasti je ale vždy vyžadováno jejich chlazení (v některých případech až na teploty kapalného dusíku) [9].

Ve druhém řádku tabulky jsou porovnána maxima kvantové účinnosti. Kvantovou účinnost fotodetektoru ovlivňuje fyzická struktura detektoru a typ použitého fotosenzitivního materiálu [9]. Hodnoty uvedené v tabulce ukazují, že polovodičová zařízení mají vyšší kvantovou účinnost ve srovnání s fotonásobiči.

Výběr na základě intenzity dopadajícího světla

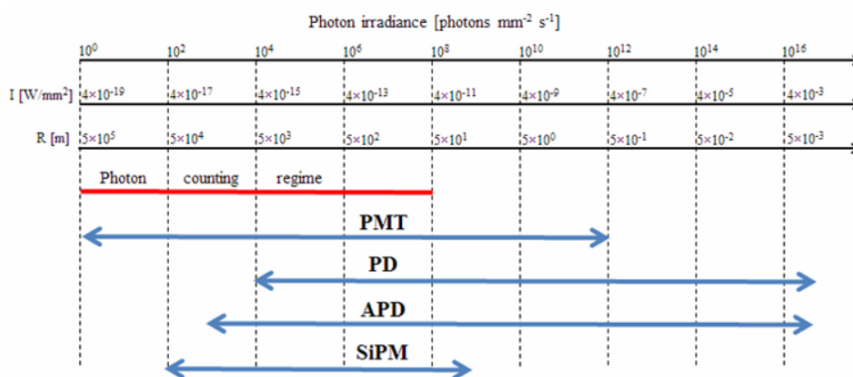
V dalším kroku při výběru vhodného fotodetektoru je třeba odhadnout poměr S/N na výstupu detektoru pro dané dopadající světlo. Cílem je dosáhnout co nejvyšší hodnoty.

Na výstupní signál může být pohlíženo jako na chronologickou sekvenci proudových impulsů, přičemž každý impuls pochází od jednoho fotoelektronu [9]. Počet fotoelektronů ve fotodetektoru je přímo úměrný energii dopadajícího světla. Vyšší

hodnoty S/N lze dosáhnout zvýšením vstupního signálu a to buď zvětšením energie dopadajícího světla, nebo výběrem fotodetektoru s větší aktivní oblastí. S/N lze také zvýšit snížením šumu a to buď výběrem fotodetektoru s nižším inherentním (termickým) šumem, nebo omezením náběžné doby impulsu.

Fotodetektory se často srovnávají na základě veličiny NEP, která se udává pro maximum vlnové délky světla [9]. Fotodetektor s nižším NEP poskytuje vyšší výstupní S/N pro danou sílu dopadajícího světla.

Na obrázku 2.16 je zobrazena vhodnost výběru různých typů fotodetektorů v závislosti na vlastnostech vstupního světla. Horní osa odpovídá ozáření fotonem (počet fotonů na mm^2 za s). Osa pod ní ukazuje odpovídající ozáření ze předpokladu monochromatického světla s vlnovou délkou 550 nm. Spodní osa udává vzdálenost R od zdroje o výkonu 1 W, který produkuje odpovídající ozáření uvedené na ose výše. Červená úsečka na obrázku představuje režim, kdy jsou proudové impulsy časově rozlišitelné a detekují se jednotlivě (počítání fotonů). Fotonásobič je nejvíce vhodný pro nízkou úroveň dopadajícího světla. Při zvyšování jeho úrovně se stávají vhodné křemíkové fotonásobiče, lavinové fotodiody a nakonec konvenční fotodiody.



Obrázek 2.16: Citlivost různých druhů fotodetektorů - PMT (fotonásobič), PD (fotodioda), APD (lavinová fotodioda) a SiPM, na vlnovou délku světla. (převzato z [9])

Výběr na základě časových vlastností dopadajícího světla

Intensita dopadajícího světla může být závislá na čase [9]. Konstantní proud světla má konstantní intensitu. Pokud proud světla v čase kmitá, je jeho intensita v čase proměnlivá. Pulsní dopadající světlo přichází ve formě diskretních balíčků fotonů. Konstantní proud světla nijak neovlivňuje parametry fotodetektoru. Naopak u kmitajícího a pulsního proudu světla ovlivňují kapacita PN přechodu a parazitní, nebo termické impulsy parametry náběžné doby, časového rozlišení a šířku frekvenčního pásma fotodetektoru. Tyto parametry jsou porovnány v tabulce 2.1.

Se zvyšující se šířkou frekvenčního pásma se zvyšuje šum fotodetektoru [9]. Pro náběžnou dobu impulsu fotodetektoru t_r (ns) a jeho frekvenční šířku pásma B (GHz)

platí aproximativní vztah:

$$B = \frac{0,35}{t_r} \quad (2.4)$$

Naměřená hodnota t_r závisí na provozních podmínkách detektoru. V případě fotonásobiče tato hodnota klesá se zvyšujícím se napětím. U fotodiod a SiPMs klesá tato hodnota s růstem závěrného napětí. Náběžná doba impulzu je také ještě ovlivňována detekční elektronikou např. zesilovačem.

Výběr založený na prostorových charakteristikách dopadajícího světla

Fokusační optika dokáže zvýšit energii dopadajícího světla a tím i zlepšit poměr S/N, pokud je světlo kolimováno [9]. V případě, že je ale dopadající světlo difúzní (rozptýlené), fokusační optika není schopna energii zvýšit. V případě difúzního světla je jedinou možností, jak zlepšit poměr S/N, výběr fotodetektoru s větší aktivní oblastí.

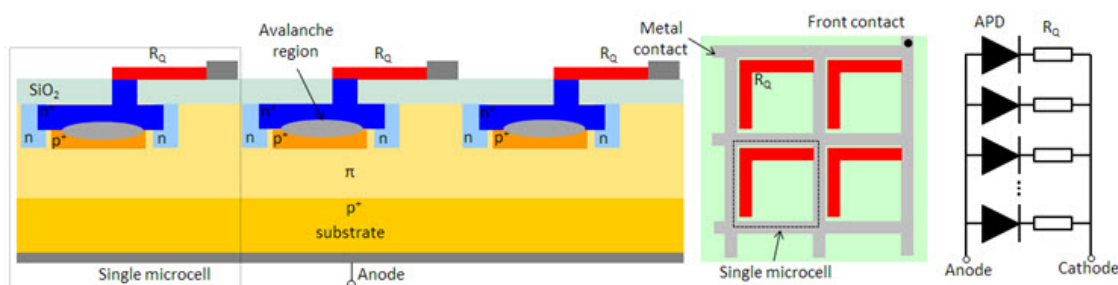
Výběr fotodetektoru na základě ceny

Pokud požadovaným vlastnostem při výběru vhodného fotodetektoru vyhovuje více než jeden fotodetektor, může být rozhodujícím faktorem jeho cena. Při srovnání typických zástupců od nejdražších po nejlevnější platí: PMT, SiPM, APD, PD [9]. Ceny mezi jednotlivými modely v daných skupinách fotodetektorů se ale mohou značně lišit.

Dalšími kritérii při výběru vhodného fotodetektoru mohou být jeho robustnost, odolnost vůči vnějším magnetickým polím, kompaktnost, snadné použití a přizpůsobení atd.

3. Křemíkový fotonásobič SiPM

Křemíkový fotonásobič se řadí k polovodičovým detektorům. Konverguje absorbované fotony na proudové impulsy trvající desítek nanosekund, obsahující $10^5 - 10^6$ elektronů [14]. Na obr. 3.1 je zobrazená typická struktura jednoho SiPM. Aktivní oblast SiPM se pohybuje v rozmezí 1 - 6 mm². Jsou spektrálně citlivé od ultrafialové do infračervené oblasti.



Obrázek 3.1: Schéma zapojení SiPM (převzato z [14])

Přepětí ΔV představuje hlavní nastavitelný parametr, který kontroluje chod zařízení [6]. Je dáno rozdílem mezi napájecím napětím systému a průrazným napětím. SiPM je analogový přístroj, který produkuje v čase proměnlivý výstupní signál měřený v reálném čase.

Hlavní charakteristiky měřené u křemíkových fotonásobičů jsou průrazné napětí, zášecí odpor, závislost zisku vůči přepětí, fotonová detekční účinnost, pravděpodobnosti přeslechů a zpožděných pulzů (crosstalky a afterpulsy) a temné impulzy.

V posledních letech začali SiPMs nahrazovat fotonásobiče v mnoha optických aplikacích [6]. Na rozdíl od fotonásobičů pracují při nižších napětích, jsou odolné k magnetickým polím, jsou více robustní a odolnější a jsou menší. SiPMs se používají např. v pozitronové emisní tomografii, k detekci radiace ve fyzice vysokých energií, nebo v dálkovém měření vzdálenosti - metoda LIDAR.

3.1 Provozní principy a charakteristiky

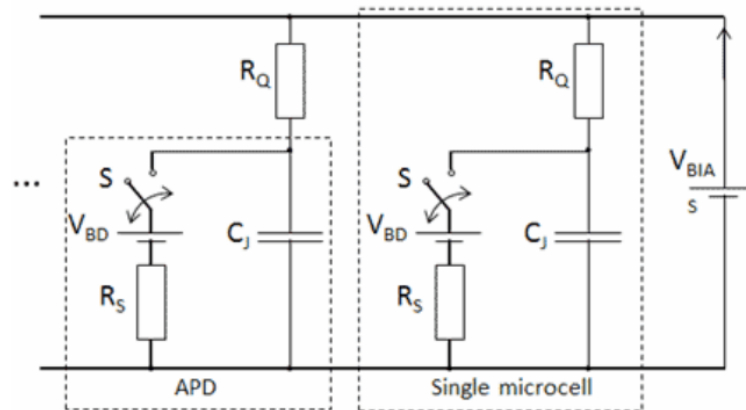
V této kapitole budou popsány základní provozní principy a charakteristiky křemíkových fotonásobičů.

Obdobně jako lavinové fotodiody lze SiPMs vyrobit ve dvou strukturách buď N-na-P, nebo P-na-N [6]. Každá z těchto struktur je citlivá na jiné vlnové délky. Od-

lišná citlivost je způsobena rozdílnou vzdáleností, kterou musí elektron urazit přes vyprázdněnou vrstvu předtím, než je nashromážděn. Co se týče struktury N-na-P fotony o delších vlnových délkách generují páry elektron-díra v oblasti P kvůli větším absorpčním hloubkám těchto vlnových délek v křemíku. Ve struktuře P-na-N jsou generovány páry elektron-díra fotony o kratších vlnových délkách též v oblasti P, zde je to příčinou nižších absorpčních hloubek oněch vlnových délek v křemíku. Fotoelektron, který je generován na straně P vyprázdněné vrstvy pak driftuje přes PN přechod v opačném směru, než je směr elektrického pole ve vyprázdněné vrstvě. Delší dráha elektronu a jeho vyšší ionizační účinnost mají za následek větší pravděpodobnost iniciace laviny a s tím spojené detekce.

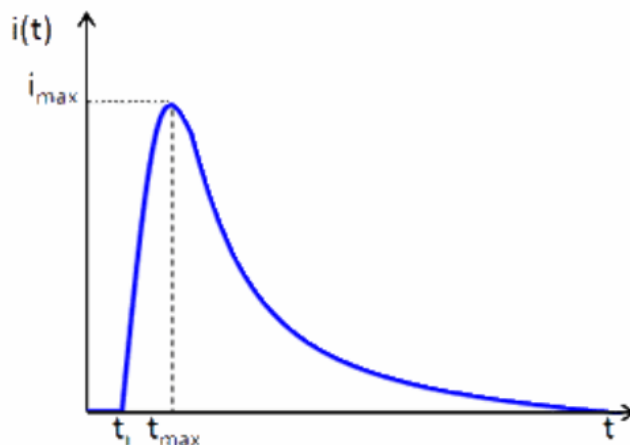
Zhášecí odpor R_Q slouží k ukončení Geigerova výboje v pixelu [7]. Jeho hodnota má vliv na amplitudu jednoho fotoelektronového pulsu a spolu s kapacitou ovlivňuje dobu zotavení. Ke zhášení by nemohlo dojít, pokud by hodnota zhášecího odporu byla příliš malá (pod určitou hranicí), pixel by byl neustále ve stavu Geigerova výboje a nebyl by citlivý na dopadající světlo.

Na obr. 3.2 je zobrazen zjednodušený obvod zapojení SiPM [14]. Nedopadá-li na něj světlo je přepínač otevřený a napětí na kapacitě C_J je rovno V_{BIAS} . Dopadající foton vytvoří pár elektron-díra, přičemž jeden z nich driftuje do oblasti tvorby lavin. Jakmile je lavina spuštěna, přepínač se uzavře, což způsobí vybíjení kapacity přes rezistor R_S . Napětí na kapacitě postupně klesá a zmenšuje tak pravděpodobnost nárazové ionizace. Pro určitou hodnotu R_Q bude pravděpodobnost nárazové ionizace nakonec tak malá, že dojde ke zhášení laviny. V tento moment se spínač otevře a V_{BIAS} začne nabíjet kapacitu s časovou konstantou $R_Q C_J$. Na obr. 3.3 je znázorněn průběh proudu při popsaném procesu, přičemž v čase t_i dochází ke vzniku laviny a v čase t_{max} začíná zhášení.



Obrázek 3.2: Obvod SiPM napájený vnějším zdrojem napětí V_{BIAS} , R_Q je zhášecí odpor, C_J kapacita, S přepínač, V_{BD} zdroj napětí a R_S je rezistor představující odpor lavinové fotodiody. (převzato z [14])

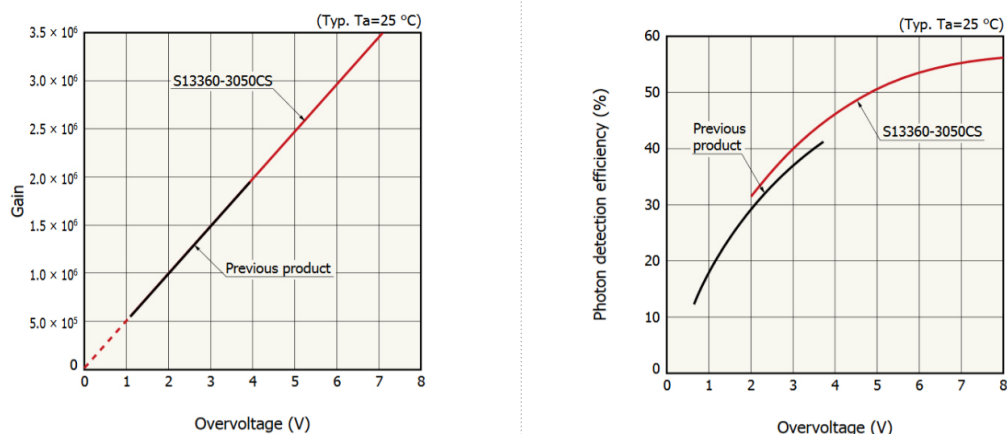
Fotonová detekční účinnost PDE SiPM je závislá na teplotě [6]. Závisí na kvantové účinnosti křemíku, která roste se zvyšující se teplotou. Je to důsledkem vyšších vibrací fononů, které usnadňují přechod elektronů do vodivostního pásu a děr do valenčního pásu, čímž se zlepšuje fotocitlivost křemíkového krystalu. Naopak pravděpodobnost vzniku laviny klesá se zvyšující se teplotou. Ve výsledku je



Obrázek 3.3: Průběh proudu protékajícího SiPM při absorpci fotonu (převzato z [14])

tedy PDE ovlivňována dominantnějším faktorem ze zmíněných dvou. V určitých teplotních rozmezích může PDE zůstat stabilní.

Zisk SiPM klesá se zvyšující se teplotou, je to analogií k lavinovým fotodiodám. Na obrázku 3.4 jsou zobrazeny závislosti zisku a PDE SiPM na přepětí.



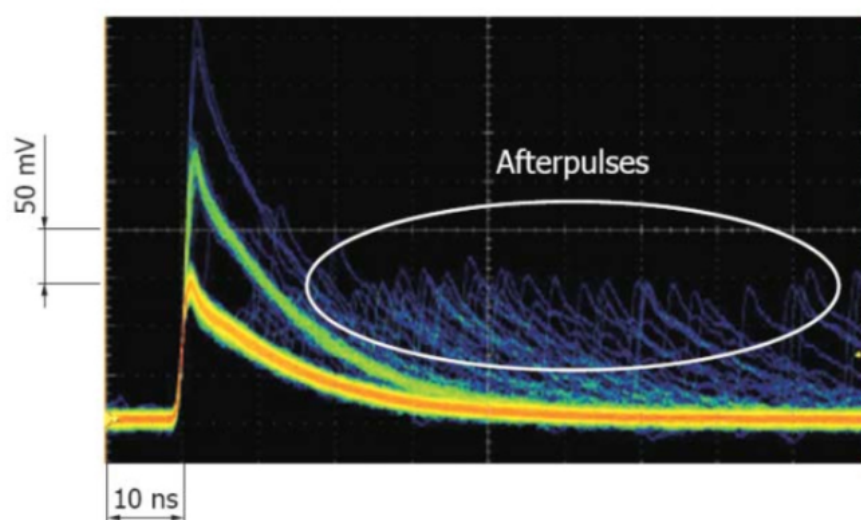
Obrázek 3.4: Závislost zisku (v pravo) a PDE (v levo) SiPM na přepětí (převzato z [6])

Temné impulsy jsou náhodné šумы, které se objevují společně s pravými impulsy od fotonů [6]. Jsou závislé na teplotě. Škodí v aplikacích, kde se SiPM využívá pro počítání jednotlivých fotonů. Temné impulsy v těchto aplikacích nepředstavují tak velký problém pokud je časový interval, během něž jsou interakce jednotlivých fotonů nejpravděpodobnější, dostatečně krátký a detekční systém je schopen jej znát. Mohou být dále sníženy termoelektrickým chlazením přibližně na polovinu při ochlazení o 10 °C . V aplikacích s větším množstvím fotonů lze temné impulsy eliminovat zvýšením diskriminační hladiny.

U křemíkových fotonásobičů pozorujeme ještě další dva druhy šumů, jsou jimi

zpožděné impulsy (afterpulsy) a přeslechy (crosstalky) [6].

1. **Afterpulsy** - během lavinového procesu se malé množství nosičů náboje v lavině zachytí v pastech (vznikají díky přítomnosti různých nečistot v krystalu). Tyto nosiče mohou být z pasti uvolněny poté, co přijmou dostatečné množství energie, což může trvat 1-10 ns. Poté znovu vstoupí do vodivostního nebo valenčního pásu. Nosiče uvolněné z pastí iniciují nové laviny, které jsou však opožděny oproti původním lavinám. Na obr. 3.5 jsou afterpulsy zobrazeny. Zpožděný impuls se také může uvolnit během doby zotavení. V tomto případě bude jeho amplituda menší, než amplituda běžného pulsu. Díky tomu může být odlišen od pravých impulsů pulsní výškovou analýzou (PHA). Uvolní-li se ovšem po době zotavení, pak jeho amplituda bude mít plnou výšku jako amplituda výstupního impulsu.



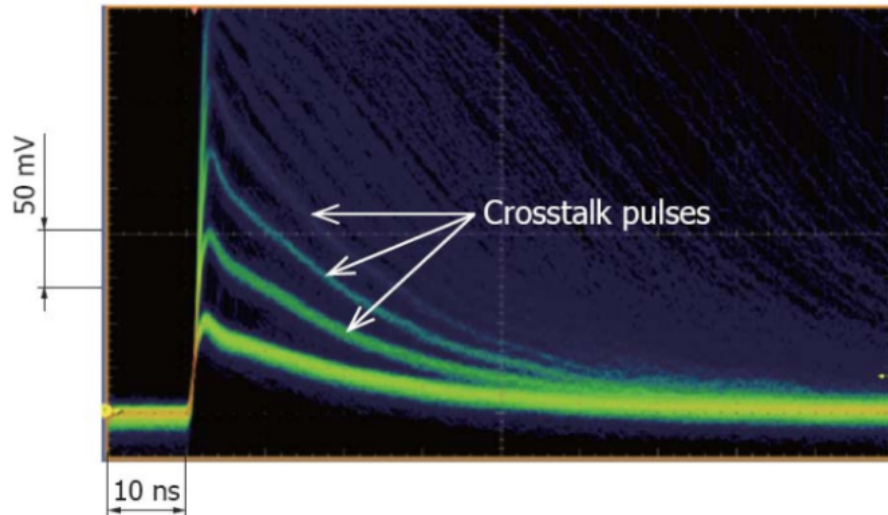
Obrázek 3.5: Křivka ukazující afterpulsy (převzato z [6])

2. **Optické crosstalky (OC)** - veškerá kinetická energie nosičů náboje v lavině nemusí nutně přispívat ke tvorbě nových nosičů. Část energie se může ztrácet jako teplo vibracemi fononů. Část se ale také může uvolnit ve formě fotonů. Takto vzniklé fotony mohou dopadnout na sousední pixely a iniciovat v nich laviny. Tento jev se nazývá optický crosstalk. Crosstalky jsou zobrazeny na obr.3.6. Lze je odstranit pouze zvýšením diskriminační hladiny zařízení, které slouží k počítání jednotlivých fotonů. Z toho důvodu jsou crosstalky obzvláště škodlivé při měření nízkých intenzit světla. Například firma Hamamatsu Photonics ale implementuje kolem každého pixelu tzv. „optický příkop“, čímž je fotonům znemožněn přístup k vedlejším pixelům.

Výstupní signál S_{output} SiPM lze vypočítat pomocí vstupního signálu S_{input} následujícím vztahem:

$$S_{\text{output}}(e^-) = (S_{\text{input}}(\text{fotony}) \cdot QE \cdot CE \cdot M) + S_{\text{dark}}(e^-) \quad (3.1)$$

kde M je zisk detektoru, CE je účinnost sběru náboje, QE kvantová účinnost, S_{dark} je výstupní signál detektoru způsobený nábojem, jež nevznikl fotoelektrickým jevem



Obrázek 3.6: Křivka ukazující optické crosstalky (převzato z [6])

při měření [6]. CE lze určit jako součin pravděpodobnosti vzniku laviny a tzv. fill faktoru, což je poměr aktivní plochy jednoho pixelu ku celkové ploše všech pixelů.

Křemíkové fotonásobiče mají binární odezvu, proto lze ve vzorci (2.3) zanedbat člen N_{output} [6]. Poměr S/N je pak pro SiPM dán vztahem:

$$S/N = \frac{N_{foton} \cdot PDE}{\sqrt{(N_{foton} \cdot PDE) + N_{dark}}} \quad (3.2)$$

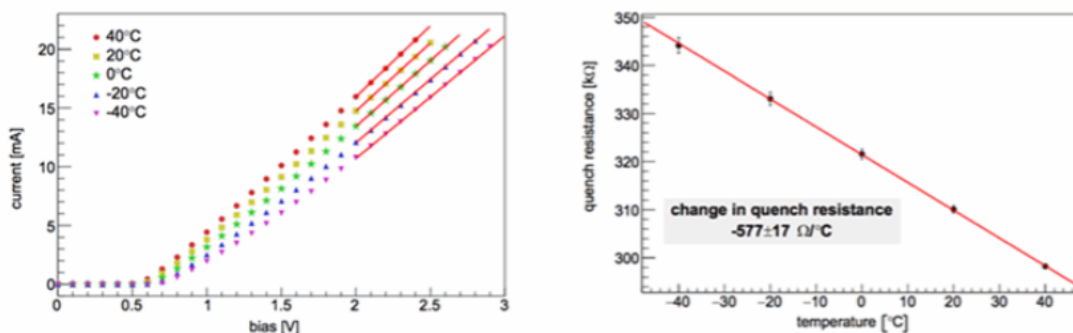
kde součin $N_{foton} \cdot PDE$ udává počet detekovaných fotoelektronů a N_{dark} je počet temných impulzů na výstupu detektoru. Vztah (3.2) je pouhým zjednodušením, jelikož neuvažuje tvorbu crosstalků.

3.2 Vliv teploty na provoz SiPM

Změna teploty značně ovlivňuje práci všech polovodičových zařízení, tedy i křemíkových fotonásobičů. Se změnou teploty se mění koncentrace nosičů náboje v dopované a intrinsické oblasti. Koncentrace nosičů náboje má dopad na odpor zařízení, interakce elektron-fonon a díra-fonon a na množství tepelně generovaných nosičů náboje, tedy ovlivňuje výstupní temný proud. V této kapitole budou popsány dopady změny teploty na hlavní opto-elektronické vlastnosti SiPM.

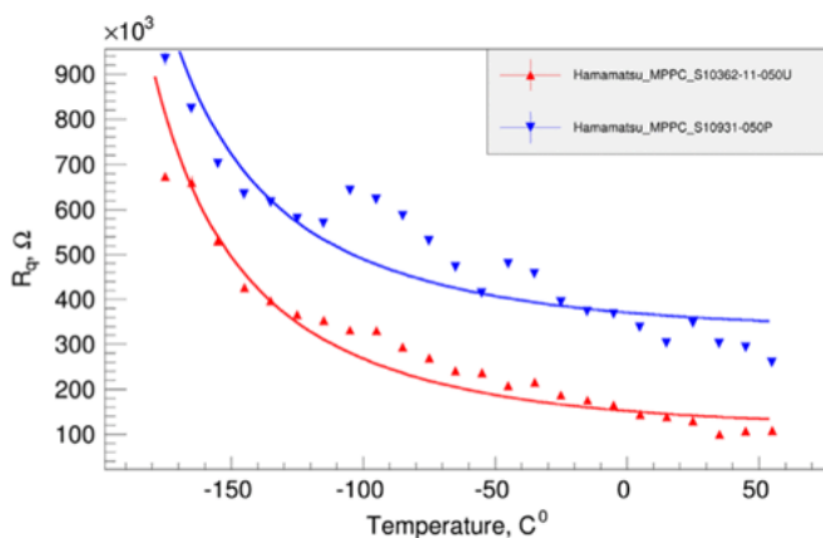
Zhášecí odpor

Zhášecí odpor lze určit z I-V charakteristiky v propustném směru [7]. Na obr.3.7 je nalevo zobrazena I-V charakteristika a napravo je vynesena závislost zhášecího odporu na teplotě pro jeden křemíkový fotonásobič od firmy Hamamatsu Photonics. Hodnoty zhášecího odporu v pravé části obrázku byly získány z lineárního fitu z levé části (zobrazeno jako červené čáry). Z pravé části obrázku lze pozorovat, že v rozmezí teplot $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ klesá zhášecí odpor lineárně s teplotou.



Obrázek 3.7: Na levo je zobrazena I-V charakteristika v propustném směru při různých teplotách fitovaná lineární přímkou (červené přímky). V pravé části jsou zobrazeny odpovídající hodnoty zhášecího odporu získané z pravé části v závislosti na teplotě (převzato z [7])

Na obrázku 3.8 jsou porovnány zhášecí odpory v závislosti na teplotě v rozmezí od -175 °C do 55 °C pro dva různé křemíkové fotonásobiče od firmy Hamamatsu Photonics. Jak je z obrázku patrné při takto velkém rozpětí teplot už není závislost lineární [7].

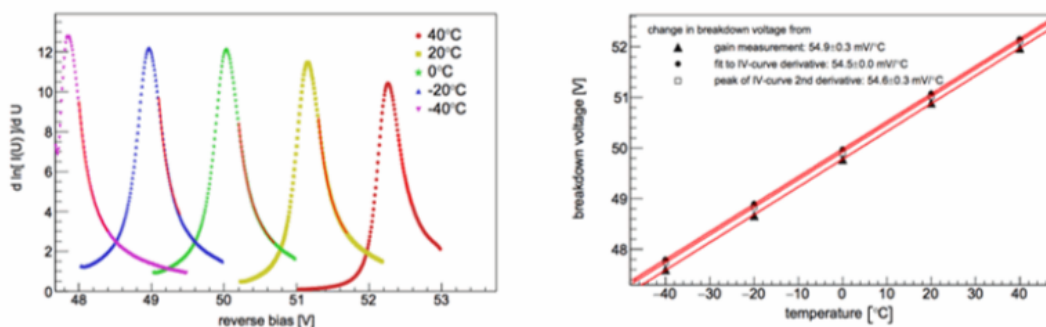


Obrázek 3.8: Zhášecí odpor v závislosti na teplotě pro dva SiPM od firmy Hamamatsu Photonics, fitované závislostí $a + bT^{1/2}e^{c/T}$, kde T je teplota a a, b, c jsou volitelné parametry. (převzato z [7])

Průrazné napětí

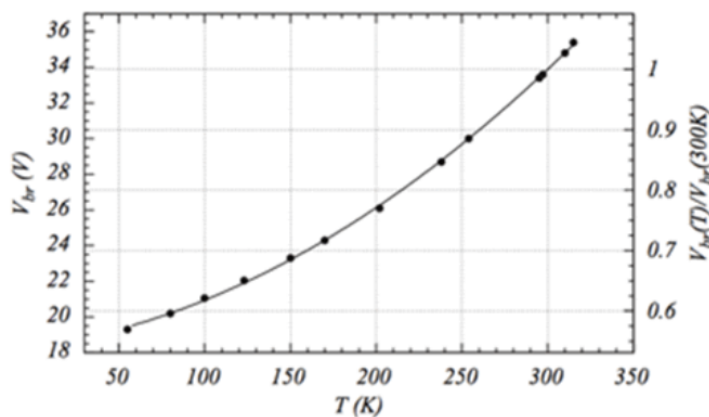
Pravděpodobnost vzniku laviny klesá s rostoucí teplotou, ke kompenzaci je proto nutné zesílit elektrické pole a to zvýšením závěrného napětí. Z toho důvodu je průrazné napětí závislé na změně teploty.

Průrazné napětí lze určit z I-V charakteristiky v závěrném směru [7]. Na obrázku 3.9 je v jeho levé části vynesena závislost $\frac{d \ln(I)}{dV}$ na napětí. Maximum zobrazených křivek odpovídá průraznému napětí při dané teplotě. V pravé části obrázku jsou vynesena průrazná napětí získaná z levé části v závislosti na teplotě. Zde je možno pozorovat, že v rozmezí teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ stoupá průrazné napětí lineárně s teplotou.



Obrázek 3.9: V levé části jsou zobrazeny křivky $\frac{d \ln(I)}{dV}$ v závislosti na napětí pro různé teploty, přičemž maxima těchto křivek udávají průrazná napětí. V pravé části jsou vynesena ona průrazná napětí v závislosti na teplotě (převzato z [7])

Na obrázku 3.10 je pak vynesena závislost průrazného napětí na teplotě ve větším rozsahu teplot, konkrétně od $-222,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $47,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tomto velkém rozmezí teplot již není závislost lineární. Pokud se ale omezíme pouze na malé intervaly teplot, závislost pak přibližně lineární je.



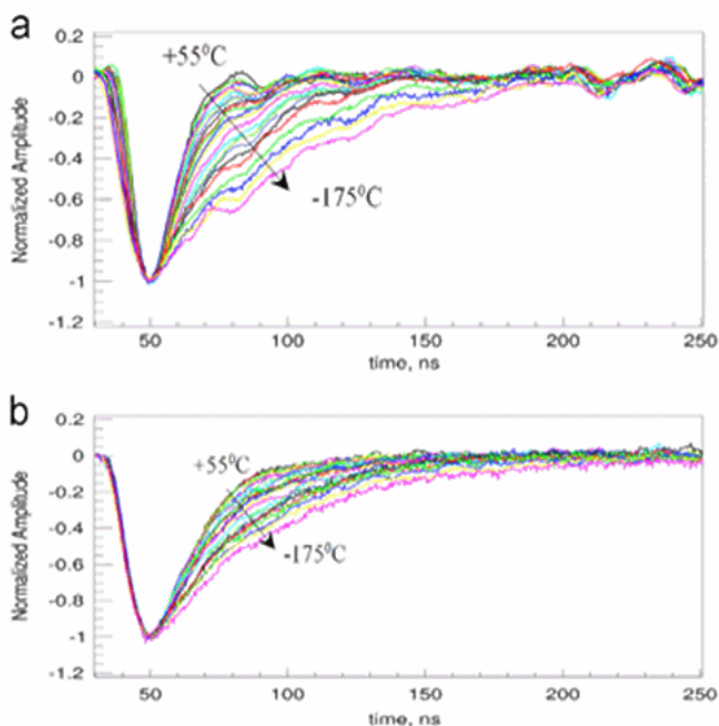
Obrázek 3.10: Závislost průrazného napětí $V_{br}(V)$ na teplotě (převzato z [7])

Zisk a kapacita přechodu

Se změnou teploty je potřeba zajistit stabilitu zisku SiPM [7]. Toho lze docílit přizpůsobením napájecího napětí s ohledem na změnu průrazného napětí a případně i kapacity přechodu. Míra závislosti kapacity přechodu na teplotě se pro konkrétní SiPM může značně lišit, ale změny nejsou nikdy příliš velké.

Tvar signálu

Tvar výstupního signálu je závislý na zhášecím odporu a kapacitě přechodu [7]. Jelikož se se změnou teploty mění jejich hodnoty, mění se i tvar signálu, viz obr. 3.11. Zvýšením teploty se zkracuje doba zotavení SiPM, ale zároveň se zvyšuje počet temných impulsů, čímž se snižuje senzitivita SiPM.



Obrázek 3.11: Závislost tvaru výstupního signálu na změně teploty. Část a) odpovídá rozměrům SiPM 1 x 1 mm² a část b) 3 x 3 mm² (převzato z [7])

Temné impulsy

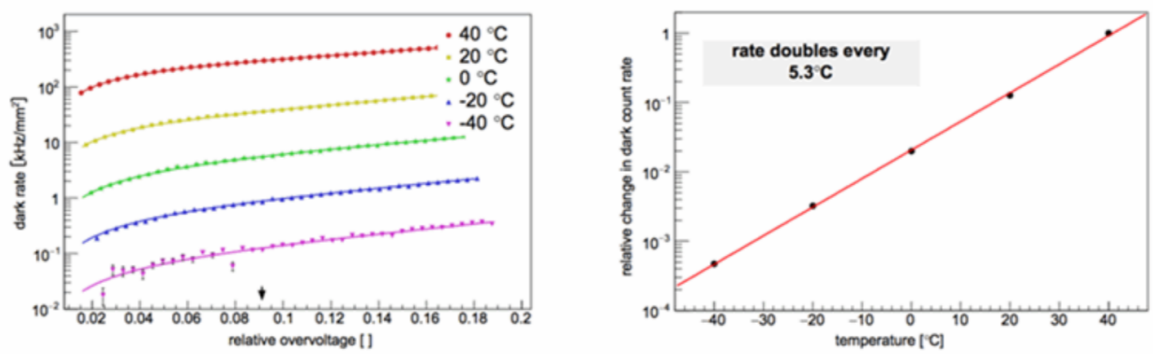
V levé části obrázku 3.12 je zobrazena závislost počtu temných impulsů na relativním přepětí při různých teplotách. V pravé části tohoto obrázku je vynesena závislost relativní změny četnosti temných impulsů v závislosti na teplotě v intervalu od -40 °C do 40 °C pro pevně danou hodnotu přepětí. Tato závislost se zdvojnásobuje s každými 5,3 °C pro ono měřené SiPM [7].

Optické crosstalky

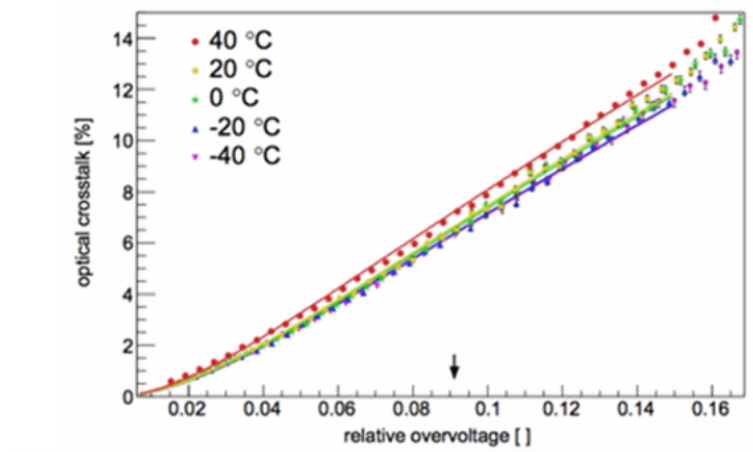
Pravděpodobnost přímého optického crosstalku¹ vzrůstá se zvyšujícím se přepětím [7]. Uvažujeme-li pevně dané přepětí, pak závisí pravděpodobnost vzniku optického crosstalku na kapacitě PN přechodu, která ovšem není nijak velká. Na obr. 3.13 lze pozorovat, že závislost pravděpodobnosti optického crosstalku na přepětí se se změnou teploty příliš nemění, což odpovídá malé závislosti kapacity PN přechodu na teplotě.

Se změnou teploty se značně mění pracovní charakteristiky SiPM. Nejvíce závislými parametry jsou průrazné napětí, které s rostoucí teplotou roste, zhasací odpor, který s rostoucí teplotou klesá a počet temných impulsů, který s rostoucí teplotou prudce roste. Vyšší počet temných impulsů zvyšuje hranici detekovatelné energie, proto je nutné v aplikacích nízkých intenzit světla SiPM chladit. Pro stabilní zisk je třeba udržovat konstantní teplotu, nebo měnit napájecí napětí s ohledem na změnu průrazného napětí.

¹Přímý crosstalk vzniká poté, co foton z primárního výboje dopadne na vedlejší pixel a v něm vyvolá lavinu.



Obrázek 3.12: V levé části je zobrazena závislost temných impulsů na relativním přepětí při různých teplotách. V pravé části je vynesena závislost relativní změny temných impulsů na změně teploty (převzato z [7])



Obrázek 3.13: Pravděpodobnost vzniku optického crosstalku v závislosti na přepětí pro různé teploty (převzato z [7])

4. Testování SiPM pro experiment DUNE

V roce 2019 se DUNE Single Phase Photon Detection system (SP-PDS) konsorcium dohodlo se společnostmi Fondazione Bruno Kessler (FBK) a Hamamatsu Photonics (HPK) na produkci SiPMs pro experiment DUNE [11]. Oba výrobci optimalizovali vybrané technologie SiPMs pro potřeby DUNE a otestovali, že fungují při teplotách 87 K a 77 K . Tyto technologie jsou:

- Hole Wire Bond technologie v S13360 chipu se silikonovým obalem od HPK. Tato technologie spočívá v elektrickém zapojení SiPM přes drát procházející dírou v jeho středu. Výhodami této technologie jsou nižší cena, malé průrazné napětí, vyšší kapacita a zisk a nízká tepelná závislost.
- NUV-HD-Cryo (citlivá oblast blízka UV - „vysoká hustota“ pixelů v SiPM - kryogenní) technologie od FBK implementovaná v SMD obalu epoxidové pryskyřice. V této technologii jsou jednotlivé pixely odděleny příkopy zajišťujícími elektrickou izolaci, jsou naplněny SiO₂ a díky rozdílnému lomu světla křemíku také zajišťují částečnou optickou izolaci mezi pixely [4].

Všechny SiPMs jsou produkovány ve velikosti 6×6 mm² [11].

Cílem předprodukční fáze je výběr jednoho typu SiPM od výrobce a produkce 3000 SiPMs od FBK i HPK [11]. Od FBK byly dodány dva typy SiPM vyrobeny technologií NUV-HD-Cryo. Jeden s velikostí jednoho pixelu 30 μm a s dobou zotavení 400 ns při 87 K, tento typ se nazývá **Standard DUNE split (FBK)**. Jelikož nejsou příkopy plněny kovovou vrstvou, představují relativně vysoké četnosti crosstalků hlavní nevýhodu tohoto typu. K jejich redukci byl vyroben druhý typ zvaný **triple trench split (FBK)**, ten obsahuje tři SiO₂ propasti k potlačení crosstalků. V tomto typu má jeden pixel velikost 50 μm .

Firma Hamamatsu navrhla jako Standard DUNE split (HPK) SiPMs založené na nízko kapacitním čipu S13360 s pixely o velikosti 50 μm , tento typ je označován jako 6050HS-LRQ [11]. Jeho doba zotavení je přibližně 30 ns při 87 K. Dále dodala stejný typ pouze s větší velikostí pixelů a dobou zotavení - 75 μm a 65 ns při 85 K. Tento typ se označuje jako 6075HS-LRQ. Hlavní nevýhodou těchto dvou typů je velká amplituda afterpulsů díky krátkým dobám zotavení. Z toho důvodu dodala firma Hamamatsu ještě další dva typy s velikostí pixelů 50 μm a 75 μm , které se označují jako 6050HS - HRQ a 6075HS - HRQ. Díky vyladění jejich tloušťky a složení kovového odporu se doby zotavení těchto typů přibližně pohybují kolem 117 ns a 254 ns.

V první fázi v roce 2020 jsme prováděli testy na 25 samostatných SiPMs, z nichž 4 byli typu Standard DUNE split od FBK a od firmy HPK jsme obdrželi 8 SiPMs typu 6050HS - LRQ a 13 typu 6075HS - HRQ. V druhé fázi jsme obdrželi 120 SiPMs, konkrétně typ 6075HS-HRQ (HPK). Tyto SiPMs už nebyly dodány samostatně, ale byly umístěny na 20 destičkách po šesti. Na destičkách byly umístěny z toho důvodu, že se takto budou dosazovat do X-ARAPUCA buněk v produkční fázi, viz obr. 1.4 v kapitole 1.2.2.

4.1 Popis provedených testů

V první fázi bylo důležité zjistit, jak se jednotlivé SiPMs chovají při teplotě 77 K, což je přibližná teplota kapalného dusíku (LN_2). Nejprve byly provedeny testy při pokojové teplotě k ověření údajů uvedených výrobcem (určení průrazného napětí a zhášecího odporu). Z I-V křivky při zapojení v propustném směru byl určen zhášecí odpor. Z I-V křivky v závěrném směru bylo definováno průrazné napětí, fotoelektronová odezva, množství temných proudů a korelovaný šum. Aby byli SiPMs vhodné pro použití na experimentu DUNE, musejí vydržet dvacet a více termálních cyklů. Jejich odezva by měla po těchto cyklech zůstat nezměněna, jinak by nebyli k použití vhodné.

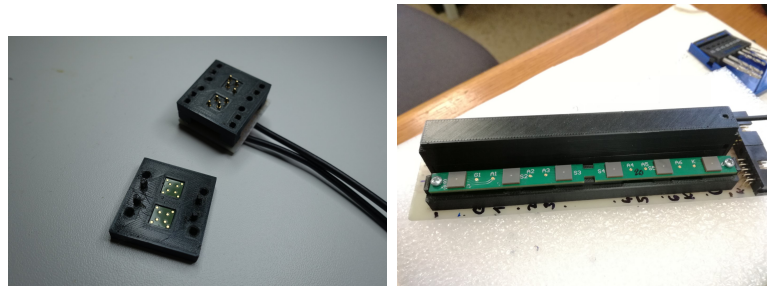
Měření byla tedy provedena nejprve při pokojové teplotě a při prvním ponoření do kapalného dusíku. Poté bylo provedeno devatenáct cyklů, přičemž v každém cyklu jsme nechali příslušné SiPMs nejprve 3 minuty zchladit v dusíkatých parách a poté jsme je na deset minut ponořili do kapalného dusíku. Po cyklování jsme opět změřili charakteristiky SiPMs v kapalném dusíku a při pokojové teplotě. Kvůli časové tísně se v první fázi cyklovala pouze část dodaných SiPMs od firmy HPK. V případě SiPMs od firmy FBK se z časových důvodů cyklování neprovádělo.

Ve druhé fázi probíhala měření obdobně jako ve fázi první. Byla ale vynechána měření při pokojové teplotě po cyklování, ta totiž nejsou pro experiment důležitá. V této fázi bylo klíčové určit rozptyl naměřených hodnot jednotlivých SiPMs na jedné destičce.

4.1.1 Aparatura

Naše měřicí aparatura sestává z Dewarovy nádoby, plněné kapalným dusíkem, uzavřené černým plastovým víkem. Víko obsahuje vyvrtanou díru, jíž jsou prostrčeny napájecí kabely a optické vlákno připojené k LED diodě. Díra byla utěsněna tmavou plastelínou, aby byl omezen průnik světla do nádoby. Dewarovu nádobu jsme ještě přikryli světlotěsnými černými látkami. SiPMs byla do nádoby ponářena v černém pouzdře (sarkofágu), viz obr. 4.1. Tato aparatura byla přímo připojena k součtu metru Keithley 6430. Měření bylo řízeno pomocí aplikace napsané v programu Labview a data byla dále zpracována pomocí programu ROOT a tabulkového editoru.

V následujících kapitolách budou popsány způsoby měření a stanovení průrazného napětí a zhášecího odporu SiPMs pro experiment DUNE, které jsem měřila v této

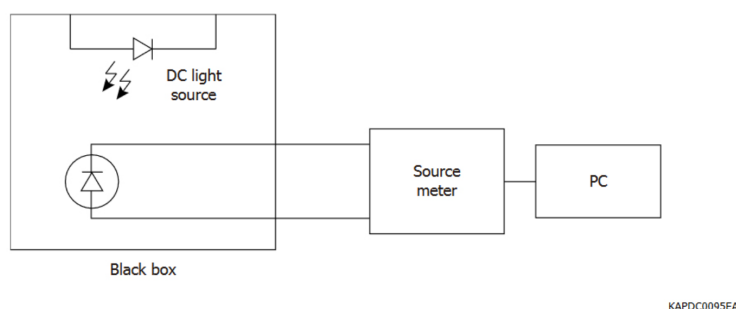


Obrázek 4.1: V levé části je zobrazen sarkofág použitý pro měření jednotlivých SiPMs v první fázi měření. V pravé části je sarkofág používaný v druhé fázi měření spolu s jednou destičkou obsahující šest SiPMs.

bakalářské práci.

4.1.2 Měření průrazného napětí

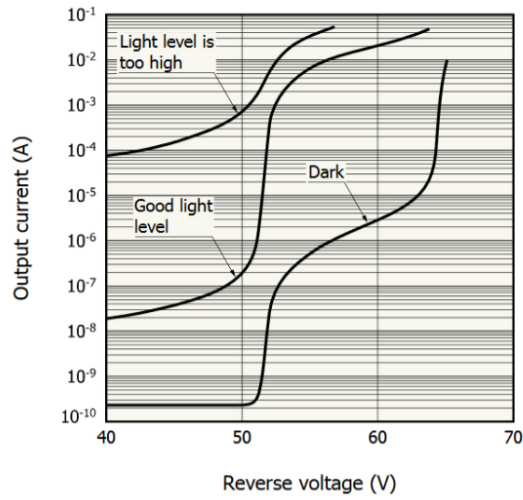
Způsobů stanovení průrazného napětí V_{br} je mnoho, záleží na měřicí aparatuře a na různých metodách vyhodnocení naměřených dat. Na obrázku 4.2 je znázorněno možné zapojení měřicí aparatury při měření průrazného napětí. V tomto zapojení je SiPM přímo spojené se source metrem, výstupní proud je jednoduše odečítán. Výstupní proud se odečítá pro různá napětí, z čehož se získá I-V křivka, která je analyzována na počítači.



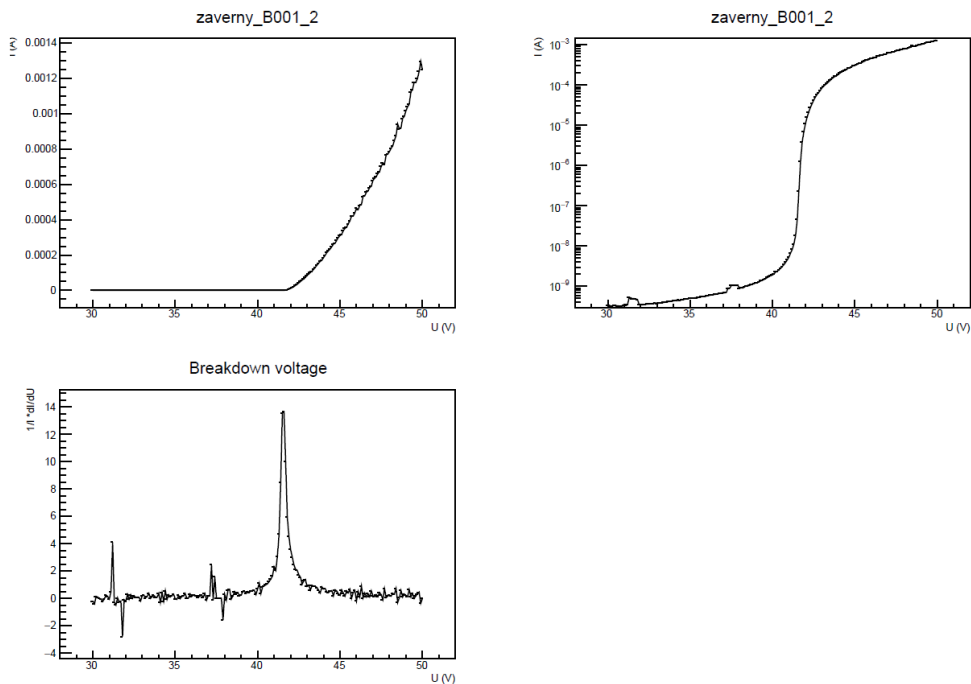
Obrázek 4.2: Zapojení aparatury měření průrazného napětí (převzato z [6])

Průrazné napětí může být z I-V charakteristiky určeno například stanovením inflexního bodu funkce $\log(I)$ [6]. Tohoto způsobu je využíváno na obrázku 4.3, kde jsou znázorněny naměřené I-V křivky pro různé úrovně osvětlení pocházející ze světelného zdroje pro jeden SiPM. Z tohoto obrázku lze pozorovat, že úroveň osvětlení SiPM ovlivňuje polohu inflexního bodu I-V křivky, a tedy ovlivňuje i stanovení průrazného napětí. V praxi by proto měl být experimentálně určen vhodný jas LED diody, přičemž by se mělo zabránit nadměrnému osvětlení SiPM.

Dalším způsobem stanovení V_{br} je definování maxima křivky $I^{-1} \frac{dI}{dV}$. Tento způsob doporučilo DUNE SP-PDS konsorcium a použila jsem ho při zpracování naměřených dat. Tvar této křivky a naměřené I-V charakteristiky je zobrazen na obr. 4.4 pro jeden námi měřený SiPM.



Obrázek 4.3: Měření A-V křivky ke stanovení průrazného napětí (převzato z [6])



Obrázek 4.4: Vlevo nahoře - naměřená I-V křivka v závěrném směru, vpravo nahoře - totožná křivka s logaritmickou ypsilonovou osou, vlevo dole - křivka $I^{-1} \frac{dI}{dV}$, jejíž maximum udává hodnotu V_{br} . Tyto křivky odpovídají konkrétně jednomu SiPM (ozn. 2) z destičky č.1 z druhé fáze měření.

V první fázi měření se měřila I-V charakteristika při pokojové teplotě v rozmezí napětí 39 - 60 V s krokem 0,1 V pro SiPMs od firmy HPK. Měření těchto SiPMs v kapalném dusíku byla provedena v rozmezí 30 - 50 V také s krokem 0,1 V. Pro SiPMs od firmy FBK byla měření I-V charakteristiky při pokojové teplotě provedena v rozmezí 20 - 40 V a v kapalném dusíku v rozmezí 15 - 35 V, obě s délkou kroku 0,1 V. Ve druhé fázi měření byly zvoleny stejné intervaly a délka kroku jako při měření SiPMs od firmy HPK v první fázi.

Z důvodu velmi malého proudu při měření v kapalném dusíku jsme na SiPM svítili. Míru osvětlení jsme přibližně stanovili tak, že při napájecím napětí 45 V protékal proud $500 \mu\text{A}$. Testy ukázaly, že v rámci přesnosti měření tato míra osvětlení neovlivňuje hodnotu V_{br} .

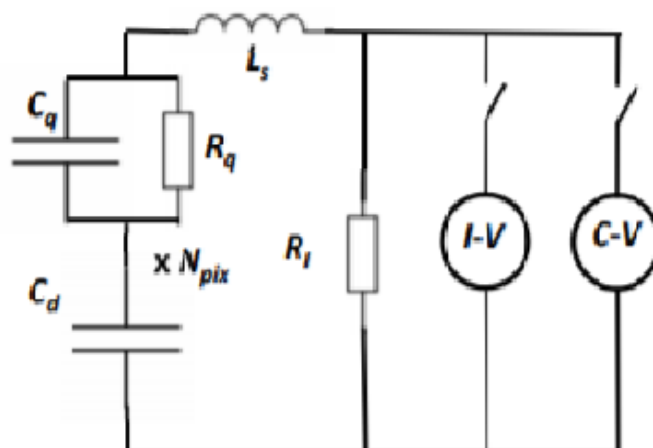
Jelikož jsem V_{br} stanovila jako maximum křivky $I^{-1} \frac{dI}{dV}$, pak přesnost jeho stanovení odpovídá délce kroku měření. Pro všechna provedená měření jsou tedy průrazná napětí určena s přesností 0,1 V.

4.1.3 Měření zhášecího odporu

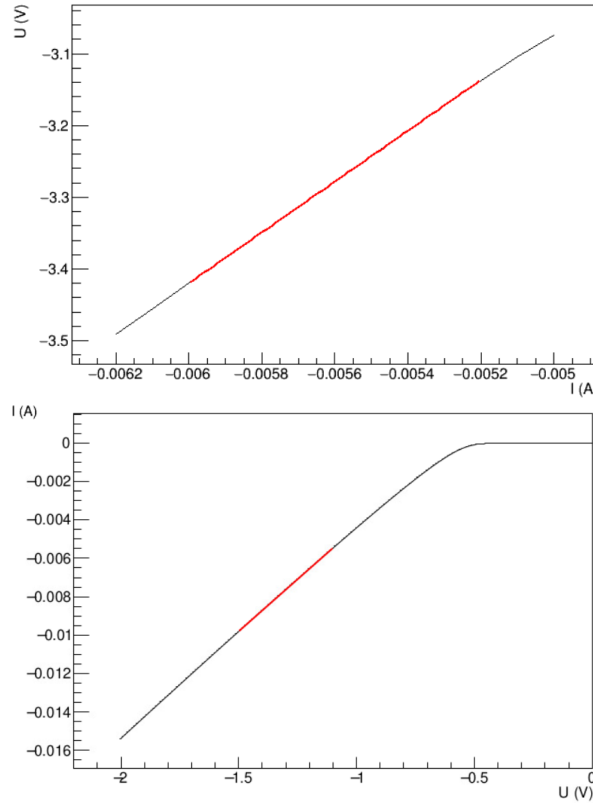
Nejběžnější metodou stanovení zhášecího odporu R_Q je měření proudu v propustném směru při zapojení zobrazeném na obrázku 4.5 se sepnutým I-V spínačem [10]. S využitím předpokladu, že zhášecí odpor je mnohem větší než sériový odpor PN přechodu a je stejný pro každý pixel, lze zhášecí odpor stanovit jako:

$$R_Q = \frac{N}{k} \quad (4.1)$$

kde k představuje sklon lineární oblasti I-V křivky a N je počet pixelů daného SiPM [8].



Obrázek 4.5: Obecné zapojení I-V a C-V měření. C_q je zhášecí kapacita, R_q zhášecí odpor, C_d kapacita pixelu, R_l parametrizuje temný proud a L_s je efektivní induktance [10])



Obrázek 4.6: V horní části je zobrazena V-I křivka fitovaná lineární přímkou v rozmezí od -6 mA do -5,2 mA, ve spodní části je zobrazena I-V křivka fitovaná lineární přímkou v rozmezí od -1,5 V do -1,1 V. Obě tyto křivky odpovídají konkrétně jednomu SiPM (ozn. 2) z destičky č.19 z druhé fáze měření, při měření v pokojové teplotě.

Zhášecí odpor jsem stanovila třemi způsoby. První dva spočívali ve fitování změřené křivky lineární přímkou v určité oblasti napětí, jde o způsob zmiňovaný o odstavec výše. Rozdíl v těchto dvou způsobech spočívá v naměřené křivce, kdy jedna je typu I-V (se změnou napětí se měří proud) a druhá typu V-I (se změnou proudu se měří napětí). V případě stanovení R_Q z V-I křivky se tvar vzorce (4.1) změní na $R_Q = kN$. Ukázky těchto fitů jsou zobrazeny na obr. 4.6

Způsob stanovení R_Q z fitu V-I křivky byl použit z toho důvodu, že ho firma HPK uvedla jako referenční, jeho hodnoty byly tedy porovnány s hodnotami obdrženy od firmy HPK, ale pouze pro měření při pokojové teplotě.

Jako třetí způsob stanovení zášecího odporu jsem použila fitování naměřené I-V křivky Shockleyho rovnicí ideální diody, která popisuje diodu v propustném i závěrném směru (já jsem jí použila pouze pro fit propustného směru). Shockleyho rovnice ideální diody má tvar:

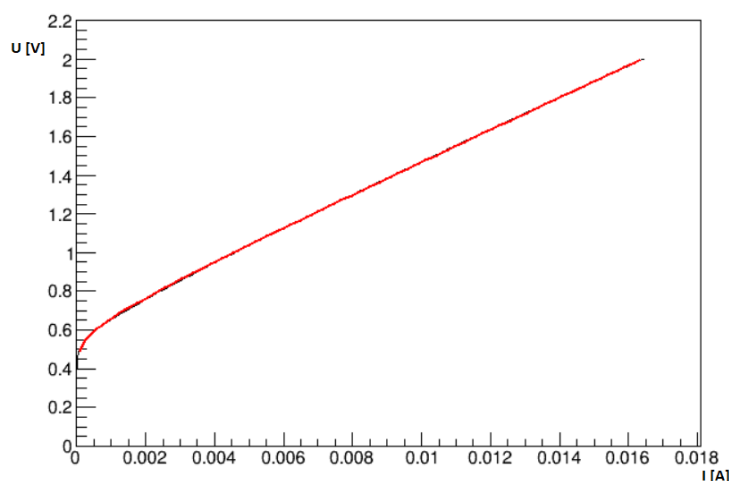
$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (4.2)$$

kde I_0 je saturační proud (proud v závěrném směru), U_T je teplotní napětí, které

je při pokojové teplotě přibližně rovno 25,84 mV, U je přiložené napětí na diodě [1]. Shockleyho rovnice nepopisuje oblast zpětného průrazu diody a zanedbává její vnitřní odpor. Rovnice předpokládá, že v diodě působí pouze drift nosičů náboje, jejich difúze a rekombinace. Pro fitování naměřených dat Shockleyho rovnicí bylo ale potřeba do ní zahrnout ještě zhášecí odpor R_Q . Rovnice (4.2) je vyjádřena jako závislost proudu na napětí. Zatímco proud je stejný v celém obvodu, napětí je rozděleno mezi odpor PN přechodu R a R_Q . Proto bylo nutno si rovnici (4.2) přepsat jako závislost napětí na proudu. Do té už se jednoduše zahrnul i odpor diody. Výsledná rovnice použitá pro fit má tedy tvar:

$$U = U_T \ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right) + R_Q I \quad (4.3)$$

Výhodou této rovnice je, že nepopisuje, na rozdíl od předchozích dvou způsobů, pouze lineární oblast I-V křivky ale i oblast jejího „kolene“, viz obr. 4.7.



Obrázek 4.7: Naměřená I-V křivka fitovaná Shockleyho rovnicí (4.3) (pro lepší přehlednost jsou zde naměřená data vynásobena -1). Tato křivka odpovídá SiPM HRQ č.4 z první fáze měření.

V první fázi měření se měřila I-V charakteristika při pokojové teplotě v rozmezí od -2 do 0 V s krokem 0,01 V pro všechny typy SiPMs. Měření v kapalném dusíku byla provedena v rozmezí od -3 do 0 V, také s krokem 0,01 V. Fit těchto měření byl proveden v oblasti od -1,5 do -1,1 V. Měření V-I charakteristik byla provedena vždy v intervalu od -6,2 do -5 mA s délkou kroku 0,1 mA. Fit těchto měření byl proveden v intervalu od -6 do -5,2 mA. Ve druhé fázi měření byly zvoleny intervaly měření I-V charakteristik při pokojové teplotě od -2 do 0 V a v kapalném dusíku od -2 do -1 V vždy s délkou kroku 0,01 V. Fitovány byly v oblasti od -1,5 do -1,1 V. Měření V-I charakteristik a jejich fit byl proveden obdobně jako v první fázi.

4.2 Naměřené výsledky

V obou zmíněných fázích testování jsem zpracovala výsledky měření ke stanovení průrazného napětí a zhášecího odporu v programu ROOT. Všechna měření probí-

hala na Fyzikálním ústavu AV ČR. Získané výsledky jsou uvedeny v následujících kapitolách.

4.2.1 První fáze - 25 SiPMs

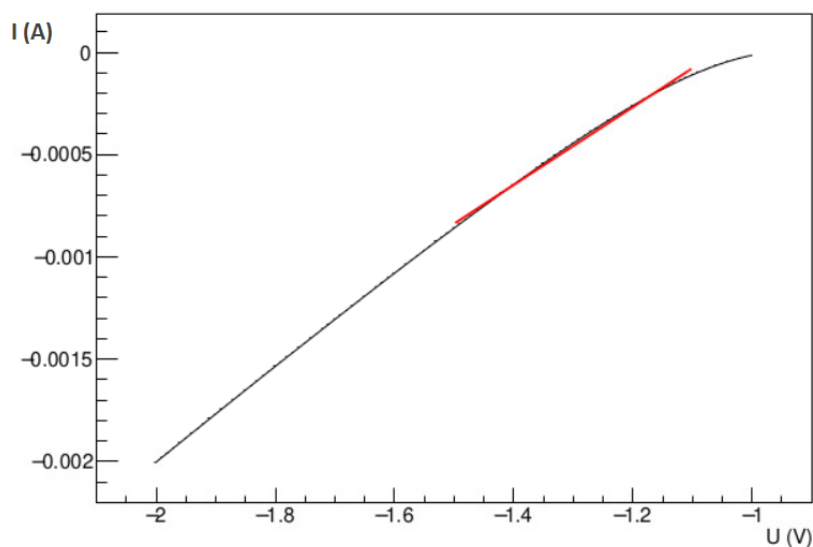
Průrazné napětí

Průrazná napětí pro jednotlivá SiPMs od obou výrobců všech měření jsou uvedena v tabulkách 4.2 - 4.4.

Při porovnání průrazných napětí za tepla a v kapalném dusíku před a po cyklování obou typů SiPM od HPK, lze pozorovat, že se jejich hodnoty v rámci směrodatné odchylky neliší a z hlediska průrazného napětí jsou tedy vhodné k dalšímu testování.

Zhášecí odpor

Zhášecí odpory pro jednotlivé SiPMs od obou výrobců pro všechna měření jsou uvedeny v tabulkách 4.5 - 4.7. Zvolená oblast fitování I-V charakteristiky není pro měření v kapalném dusíku lineární viz obr. 4.8. Proto jsem provedla fit ještě v oblasti napětí od -2 V do -1,5 V, tyto dva fity pro vybraná SiPMs typu HRQ (HPK) jsou uvedeny v tabulce 4.1. Z tabulky je patrné, že hodnoty zhášecího odporu měřené při pokojové teplotě se pro ony dvě oblasti fitu lineární přímkou liší minimálně. Je to z toho důvodu, že obě vybrané oblasti jsou při pokojové teplotě lineární a zvolená oblast fitu tak nemá na hodnotu R_Q velký vliv. Naopak hodnoty R_Q pro měření v kapalném dusíku se pro ony dvě oblasti fitování výrazně liší. Z toho lze usoudit, že tento způsob určení R_Q je silně závislý na linearitě fitované oblasti, proto je důležité zvolit vhodně onu fitovanou oblast. Pro naše měření by byla více vhodná oblast vyšších napětí.



Obrázek 4.8: I-V křivka pro SiPM typu 6075HS-HRQ (HPK) proložená polynomem stupně jedna v oblasti od -1.5 V do -1.1 V

Z hodnot R_Q před a po cyklování v obou prostředí pozorujeme, že jejich hodnoty se v rámci směrodatné odchylky cyklováním nemění.

	R_Q (Ω)							
	před cyklováním				po cyklování			
	za tepla		LN ₂		za tepla		LN ₂	
	[-1,5:-1,1 V]	[-2:-1,5 V]	[-1,5:-1,1 V]	[-2:-1,5 V]	[-1,5:-1,1 V]	[-2:-1,5 V]	[-1,5:-1,1 V]	[-2:-1,5 V]
HRQ8	85,84	84,91	473,33	364,10	88,37	85,15	474,12	368,01
HRQ9	86,79	82,43	444,43	348,15	87,19	82,79	446,97	344,47
HRQ10	88,85	85,54	473,52	368,51	88,96	85,58	476,63	371,76

Tabulka 4.1: Porovnání hodnot R_Q pro dvě oblasti fitu lineární přímkou I-V charakteristiky pro vybraná SiPMs typu HRQ.

4.2.2 Druhá fáze - 120 SiPMs

Průrazné napětí

Na obrázcích 4.9 - 4.10 jsou zobrazena průrazná napětí pro jednotlivé SiPMs po destičkách spolu s jejich střední hodnotou a směrodatnou odchylkou.

Ze stanovených hodnot V_{br} lze pozorovat, že jejich hodnoty měřené v kapalném dusíku se cyklováním nezměnili. Z těchto obrázků lze dobře pozorovat, jaký mají rozptyl hodnoty V_{br} jednotlivých SiPMs na jedné destičce.

V tabulce A.1 v příloze jsou uvedeny konkrétní hodnoty V_{br} pro všechna měřená SiPMs.

Zhášecí odpor

Na obrázcích 4.11 - 4.13 jsou zobrazeny zhášecí odpory pro jednotlivé SiPMs po destičkách spolu se střední hodnotou a směrodatnou odchylkou, kromě měření I-V při pokojové teplotě před cyklováním, jelikož bylo provedeno pouze pro dvě destičky.

Na obrázku 4.14 jsou zobrazeny zhášecí odpory pro jednotlivé SiPMs po destičkách spolu se střední hodnotou a směrodatnou odchylkou získané z fitu upravenou Shockleyho rovnicí (4.3) pro měření v kapalném dusíku před a po cyklování.

Na obrázcích 4.15 - 4.18 jsou porovnány poměry zhášecích odporů získaných z V-I měření ku hodnotám získaných z lineárního fitu a fitu Shockleyho rovnicí I-V charakteristiky pro všechna měření.

I pro hodnoty zhášecích odporů nepozorujeme jejich změnu v rámci směrodatné odchylky způsobenou cyklováním. Porovnáme-li hodnoty R_Q získané ze Shockleyho rovnice s ostatními hodnotami, pozorujeme, že jsou nejnižší. To je způsobeno tím, že fitováním dat rovnicí (4.3) nezahrnujeme do hodnoty zhášecího odporu sériový odpor diody, o který je zhášecí odpor SiPM zvětšen při určování R_Q druhými dvěma metodami. Měli bychom teoreticky dostat přímo zhášecí odpor, avšak je třeba brát v úvahu, že Shockleyho rovnice je rovnicí ideální diody a má určité předpoklady, které nejsme schopni při měření zajistit.

Přesné hodnoty zhášecích odporů jsou uvedeny v tabulce A.2 v příloze.

	V_{br} (V)			
	před cyklováním		po cyklování	
	za tepla	LN ₂	za tepla	LN ₂
HRQ1	52,65	42,55	—	—
HRQ2	51,95	41,85	—	—
HRQ3	51,85	41,85	—	—
HRQ4	52,45	42,55	—	—
HRQ5	51,75	41,55	—	—
HRQ6	52,25	42,25	—	—
HRQ7	52,55	42,45	—	—
HRQ8	52,05	41,85	51,95	41,85
HRQ9	52,55	42,35	52,45	42,35
HRQ10	52,15	41,95	52,15	41,95
HRQ11	51,85	41,65	—	—
HRQ12	52,05	41,95	—	—
HRQ13	51,95	41,75	—	—
průměr	52,16	42,04	52,18	42,05
směrodatná odchylka	0,29	0,33	0,21	0,22
relativní směr. odch.	0,006	0,008	0,004	0,005

Tabulka 4.2: Průrazná napětí SiPMs typu HRQ před cyklováním i po cyklování při pokojové teplotě a v kapalném dusíku

	V_{br} (V)			
	před cyklováním		po cyklování	
	za tepla	LN ₂	za tepla	LN ₂
LRQ1	52,55	42,45	—	—
LRQ2	51,65	41,65	—	—
LRQ3	51,65	41,75	—	—
LRQ4	52,65	42,65	—	—
LRQ5	52,85	42,55	—	—
LRQ6	52,55	42,35	52,55	42,35
LRQ7	51,85	41,85	51,95	41,85
LRQ8	51,95	41,75	51,65	41,85
průměr	52,21	42,13	52,05	42,02
směrodatná odchylka	0,46	0,39	0,37	0,24
relativní směr. odch.	0,009	0,009	0,007	0,006

Tabulka 4.3: Průrazná napětí SiPMs typu LRQ před cyklováním i po cyklování při pokojové teplotě a v kapalném dusíku

	V_{br} (V)	
	před cyklováním	
	za tepla	LN ₂
FBK1	33,15	27,05
FBK2	33,15	27,15
FBK3	33,15	27,15
FBK4	33,15	27,15
průměr	33,15	27,13
směrodatná odchylka	0,00	0,04
relativní směr. odch.	0,000	0,002

Tabulka 4.4: Průrazná napětí SiPMs typu FBK před cyklováním při pokojové teplotě a v kapalném dusíku

	R_Q (Ω)											
	před cyklováním - teplo			před cyklováním - LN ₂			po cyklování - LN ₂			po cyklování - teplo		
	I-V	Shockley	V-I	I-V	Shockley	V-I	I-V	Shockley	V-I	I-V	Shockley	V-I
HRQ1	86,14	79,52	88,89	456,07	318,69	326,20	–	–	–	–	–	–
HRQ2	85,66	80,66	87,37	460,92	326,47	335,53	–	–	–	–	–	–
HRQ3	89,23	83,67	90,82	478,25	342,63	350,78	–	–	–	–	–	–
HRQ4	86,04	79,65	89,10	452,76	315,84	322,30	–	–	–	–	–	–
HRQ5	86,02	82,53	88,16	489,19	336,77	345,86	–	–	–	–	–	–
HRQ6	88,40	82,22	90,35	476,01	332,24	335,74	–	–	–	–	–	–
HRQ7	88,53	79,54	90,52	443,94	312,33	316,82	–	–	–	–	–	–
HRQ8	85,84	82,70	88,22	473,33	337,77	338,39	474,12	338,77	346,79	88,37	82,93	89,92
HRQ9	86,79	77,65	89,18	444,43	323,10	322,12	446,97	313,68	321,11	87,19	80,26	89,59
HRQ10	88,85	83,21	89,03	473,52	346,80	342,44	476,63	351,56	349,96	88,96	83,29	90,67
HRQ11	89,30	83,58	90,60	491,03	349,61	339,89	–	–	–	–	–	–
HRQ12	89,26	83,53	91,33	481,33	346,63	344,26	–	–	–	–	–	–
HRQ13	89,52	83,77	91,30	488,78	352,07	344,71	–	–	–	–	–	–
průměr	87,66	81,71	89,60	469,97	333,92	335,77	465,91	334,67	339,29	88,17	82,16	90,06
směrodatná odchylka	1,51	1,97	1,24	16,00	13,02	10,25	13,43	15,73	12,92	0,74	1,35	0,45
relativní směr. Odch	0,017	0,024	0,014	0,034	0,038	0,030	0,029	0,047	0,038	0,008	0,016	0,005

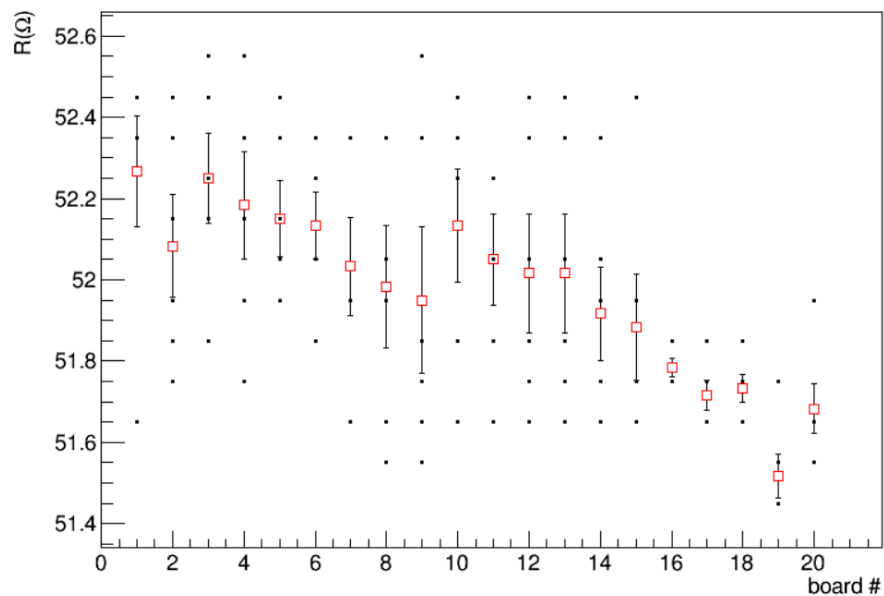
Tabulka 4.5: R_Q pro SiPMs typu HRQ před i po cyklování při pokojové teplotě a v kapalném dusíku, získané z lineárního fitu I-V a V-I charakteristiky a z fitu I-V char. Shockleyho rovnicí

	R_Q (Ω)											
	před cyklováním - teplo			před cyklováním - LN ₂			po cyklování - LN ₂			po cyklování - teplo		
	I-V	Shockley	V-I	I-V	Shockley	V-I	I-V	Shockley	V-I	I-V	Shockley	V-I
LRQ1	29,03	25,68	33,32	96,49	47,30	67,22	–	–	–	–	–	–
LRQ2	27,42	24,20	31,80	94,23	44,28	61,77	–	–	–	–	–	–
LRQ3	27,33	24,12	32,01	94,48	44,16	61,47	–	–	–	–	–	–
LRQ4	28,87	25,57	33,25	96,18	49,18	66,07	–	–	–	–	–	–
LRQ5	29,02	25,74	33,33	94,51	46,14	65,47	–	–	–	–	–	–
LRQ6	28,77	25,52	33,18	93,68	46,37	65,86	93,77	46,30	65,64	29,77	26,41	34,02
LRQ7	28,07	24,84	32,76	96,21	45,47	62,84	96,28	43,12	62,79	28,51	25,25	32,97
LRQ8	26,38	23,32	31,10	92,61	42,70	60,07	92,42	40,84	60,72	26,44	23,32	31,08
průměr	28,11	24,87	32,59	94,80	45,70	63,85	94,16	43,42	63,05	28,24	24,99	32,69
směrodatná odchylka	0,92	0,85	0,80	1,29	1,89	2,46	1,60	2,24	2,01	1,37	1,28	1,22
relativní směr. Odch	0,033	0,034	0,024	0,014	0,041	0,038	0,017	0,052	0,032	0,049	0,051	0,037

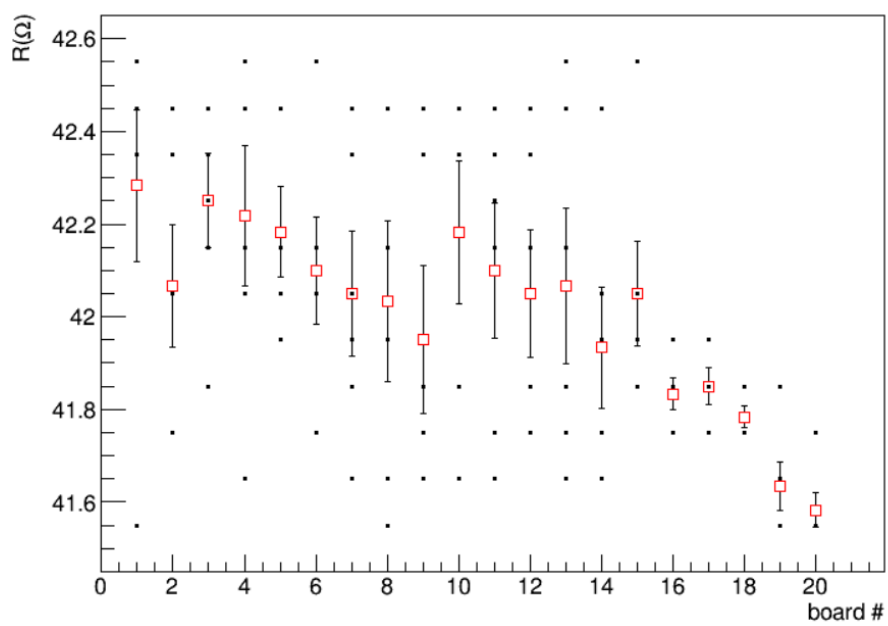
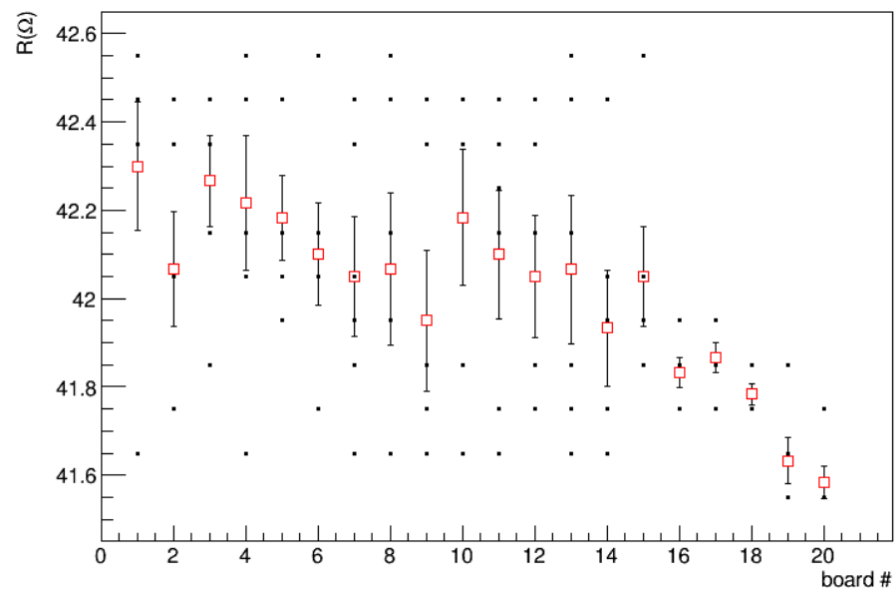
Tabulka 4.6: R_Q pro SiPMs typu LRQ před i po cyklování při pokojové teplotě a v kapalném dusíku, získané z lineárního fitu I-V a V-I charakteristiky a z fitu I-V char. Shockleyho rovnicí

	R_Q (Ω)					
	před cyklováním - teplo			před cyklováním - LN ₂		
	I-V	Shockley	V-I	I-V	Shockley	V-I
FBK1	34,47	33,65	45,85	88,52	73,36	86,70
FBK2	38,92	26,21	57,92	194,21	62,35	106,79
FBK3	30,06	25,50	32,91	91,42	75,83	89,42
FBK4	28,47	25,56	32,77	109,40	83,11	101,76
průměr	32,98	27,73	42,36	120,89	73,66	96,17
směrodatná odchylka	4,07	3,43	10,44	43,08	7,45	8,36
relativní směr. Odch.	0,124	0,124	0,246	0,356	0,101	0,087

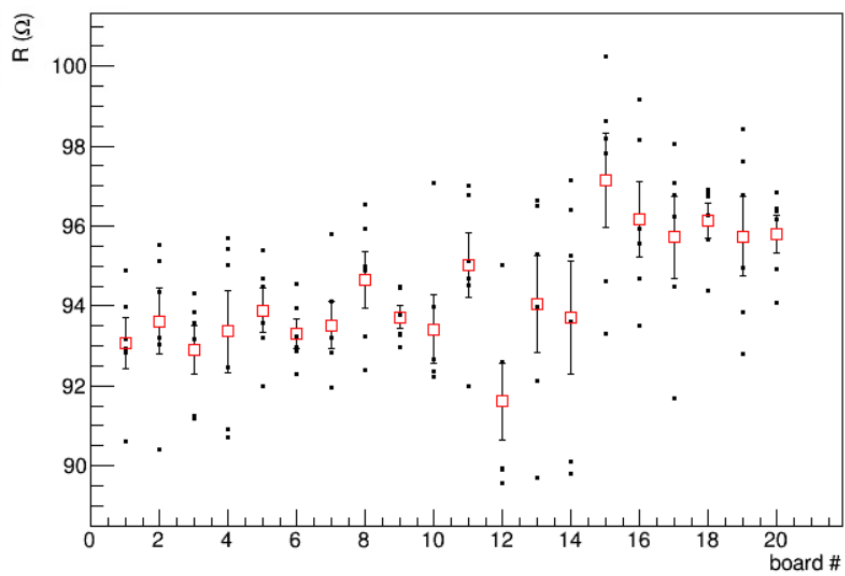
Tabulka 4.7: R_Q pro SiPMs typu HRQ před cyklováním při pokojové teplotě a v kapalném dusíku, získané z lineárního fitu I-V a V-I charakteristiky a z fitu I-V char. Shockleyho rovnici



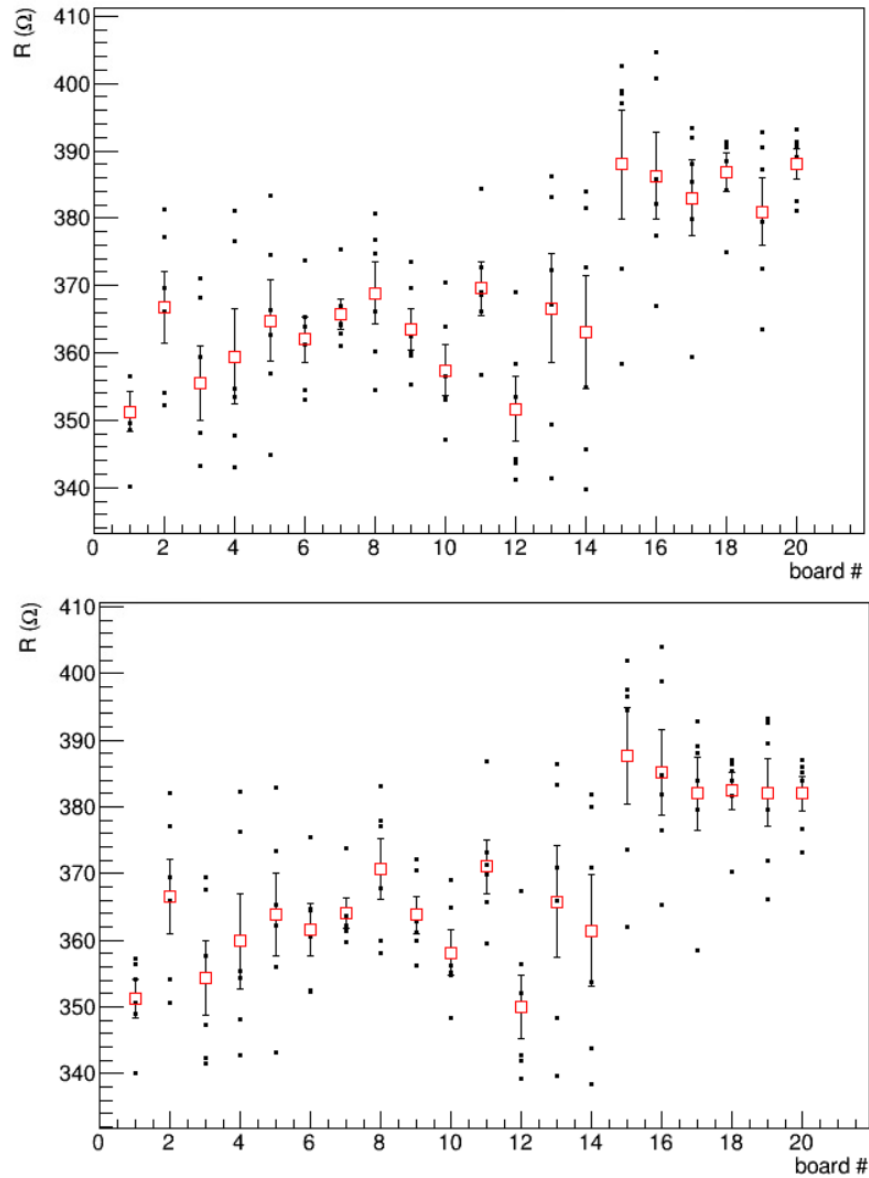
Obrázek 4.9: Naměřené hodnoty V_{br} pro jednotlivé SiPMs po destičkách při pokojové teplotě před cyklováním, červený čtverec označuje střední hodnotu dané destičky se směrodatnou odchylkou.



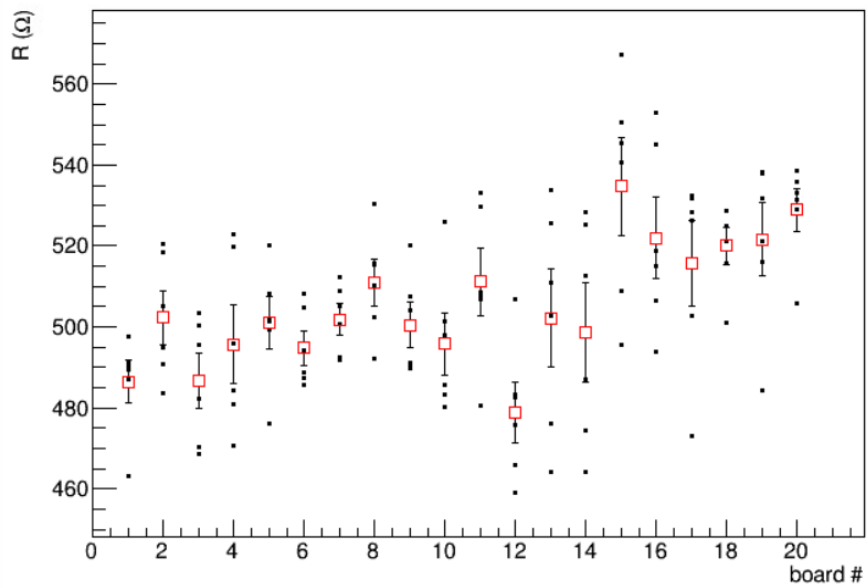
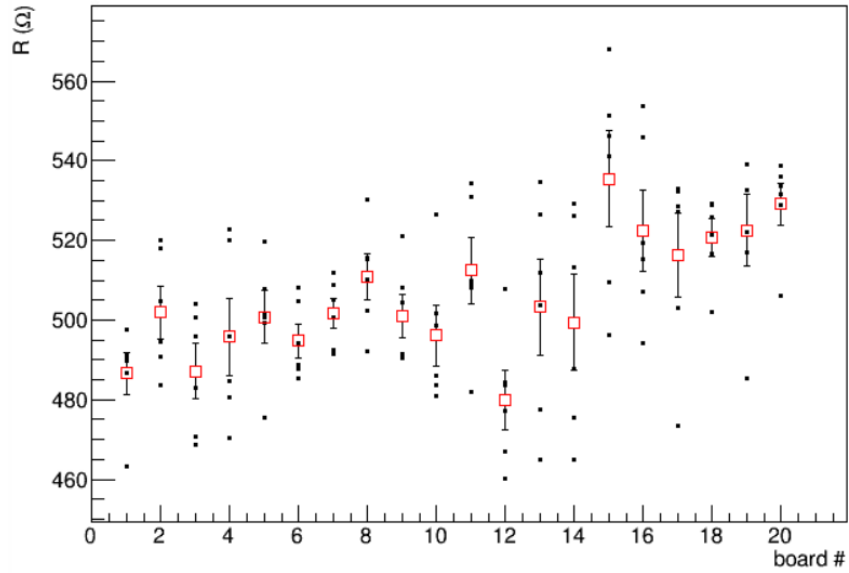
Obrázek 4.10: Naměřené hodnoty V_{br} pro jednotlivé SiPMs po destičkách v kapalném dusíku, před cyklováním v horní části a po cyklování ve spodní části obrázku, červený čtverec označuje střední hodnotu dané destičky se směrodatnou odchylkou.



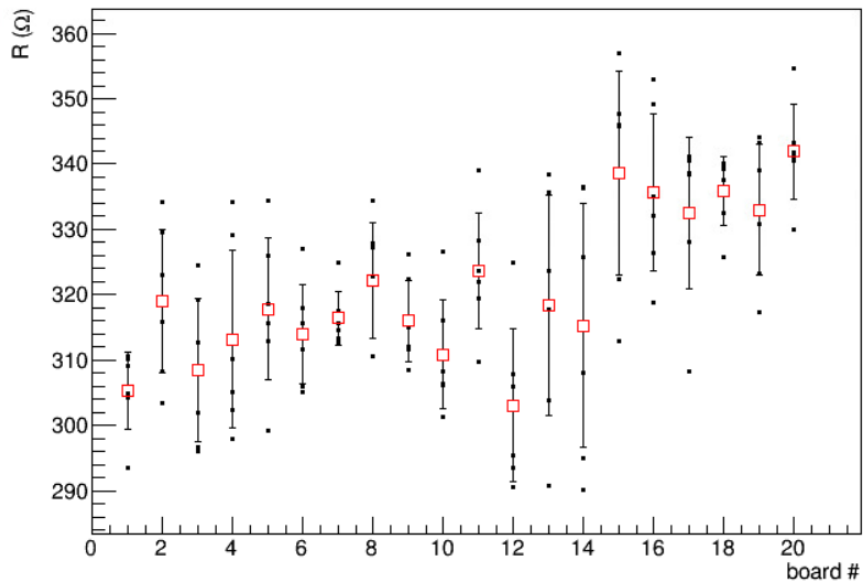
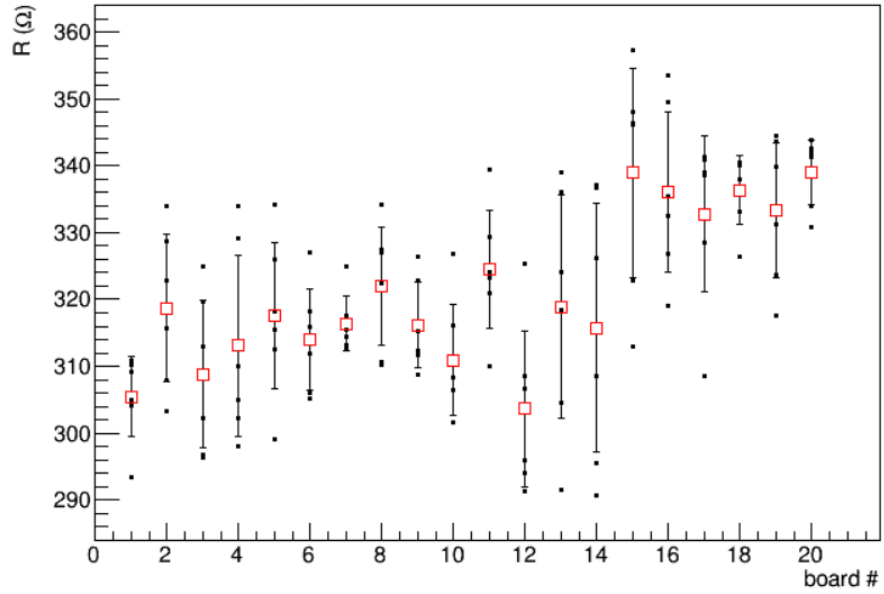
Obrázek 4.11: Hodnoty R_Q pro jednotlivé SiPMs po destičkách, pro měření V-I charakteristiky při pokojové teplotě před cyklováním, červený čtverec označuje střední hodnotu dané destičky se směrodatnou odchylkou.



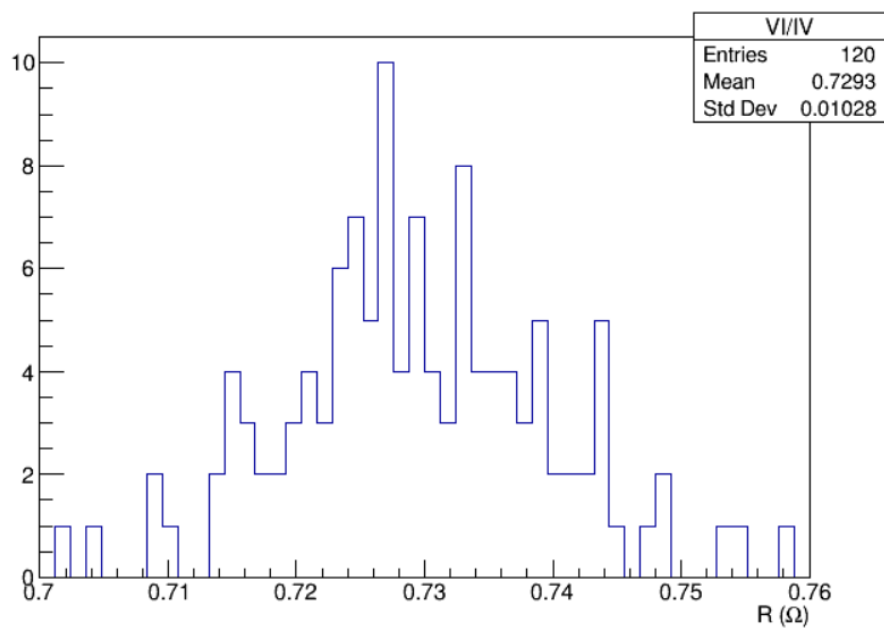
Obrázek 4.12: Hodnoty R_Q pro jednotlivé SiPMs po destičkách, pro měření V-I charakteristiky v kapalném dusíku, v horní části před cyklováním a ve spodní části po cyklování, červený čtverec označuje střední hodnotu dané destičky se směrodatnou odchylkou.



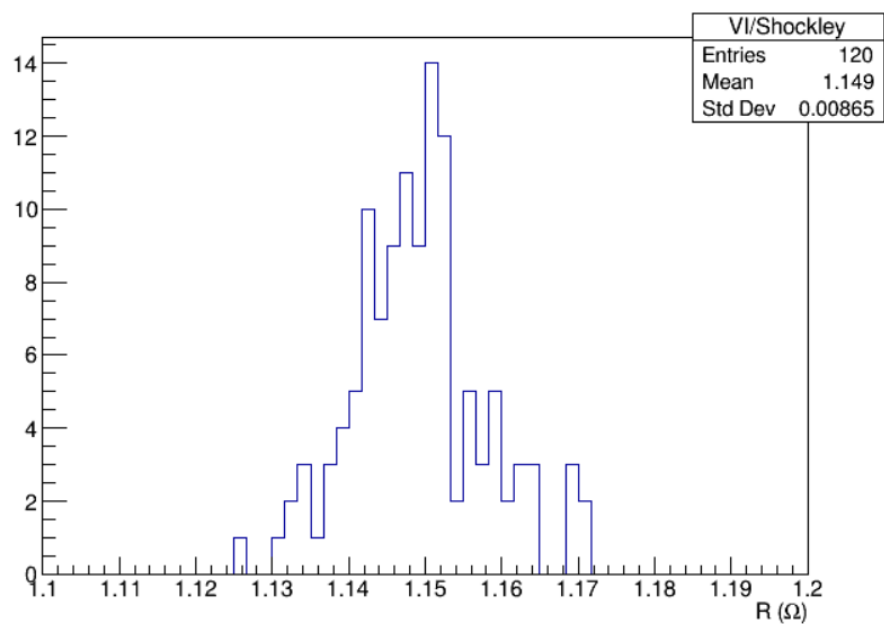
Obrázek 4.13: Hodnoty R_Q pro jednotlivé SiPM po destičkách, pro měření I-V v kapalném dusíku, v horní části před cyklováním a ve spodní části po cyklování, červený čtverec označuje střední hodnotu dané destičky se směrodatnou odchylkou.



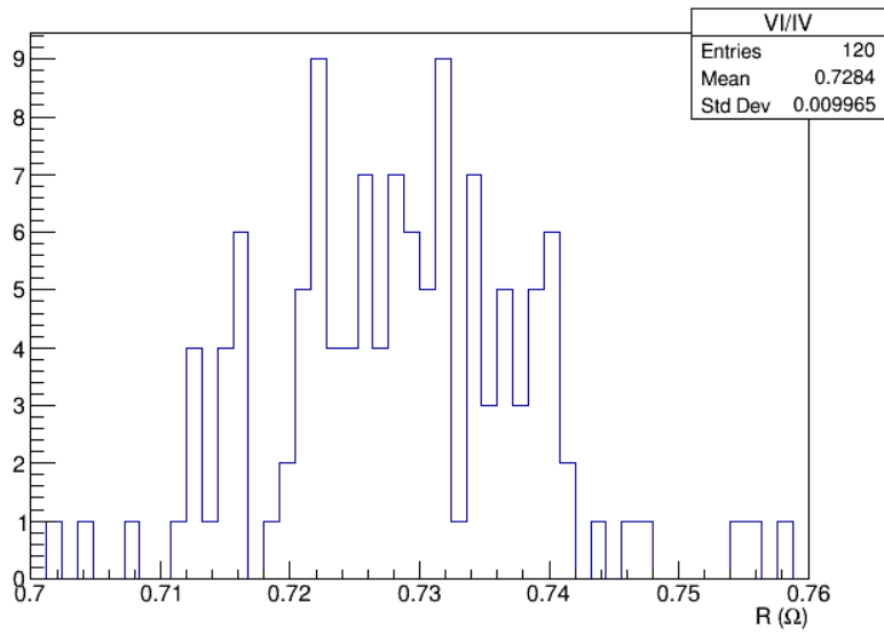
Obrázek 4.14: Hodnoty R_Q pro jednotlivé SiPM po destičkách získané z fitu rovnicí (4.3), pro měření v kapalném dusíku, v horní části před cyklováním a ve spodní části po cyklování, červený čtverec označuje střední hodnotu dané destičky se směrodatnou odchylkou.



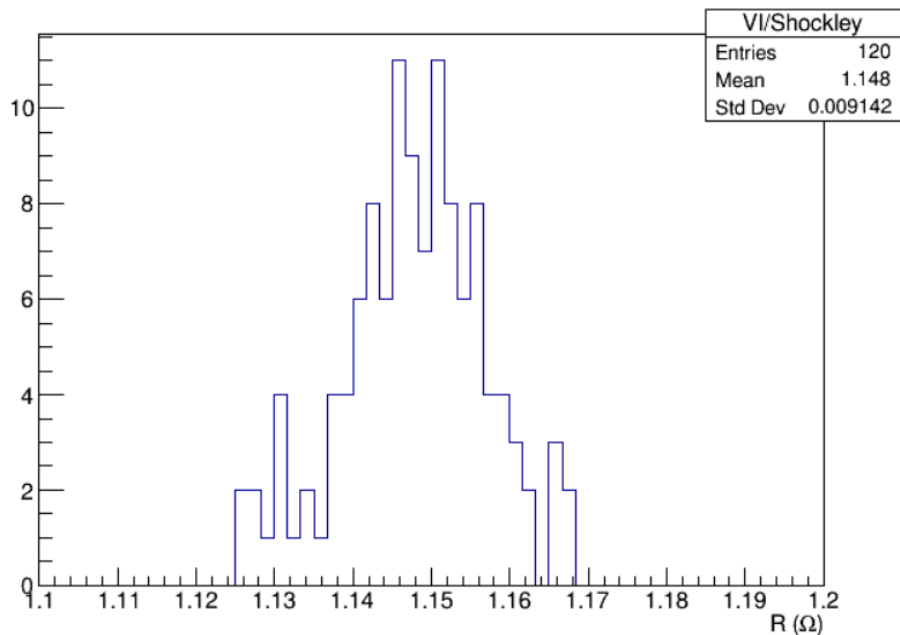
Obrázek 4.15: Histogram poměru hodnot R_Q z V-I a I-V měření, měřených v kapalném dusíku před cyklováním



Obrázek 4.16: Histogram poměru hodnot R_Q z V-I měření a Shockleyho rovnice, měřených v kapalném dusíku, před cyklováním



Obrázek 4.17: Histogram poměru hodnot R_Q z V-I a I-V měření, měřených v kapalném dusíku, po cyklování



Obrázek 4.18: Histogram poměru hodnot R_Q z V-I měření a Shockleyho rovnice, měřených v kapalném dusíku po cyklování

5. Závěr a diskuze výsledků

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo změření volt-ampérových charakteristik SiPMs při pokojové teplotě a v kapalném dusíku pro účely experimentu DUNE. Nejprve je v této práci stručně popsán fyzikální program experimentu a jeho tři hlavní části: zdroj neutrinového svazku, blízký detektor a vzdálený detektor. Nejvíce důležitou částí pro tuto práci je vzdálený detektor, který bude složen ze čtyř LArTPC detektorových modulů. Do modulu single-phase budou totiž v zařízeních zvaných X-ARAPUCA umístěny právě SiPMs, jejichž funkcí bude sběr scintilačních fotonů. Druhým modulem měl být tzv. dual-phase modul, ten se však v právě probíhající testovací fázi ukázal jako málo účinný. Bude proto nahrazen jiným modulem zvaným vertical-drift. Ten bude v sobě kombinovat single-phase modul a vertikální směr driftu vzniklých elektronů ke sběrným anodám.

Fotony emitované z citlivého objemu scintilačního/Čerenkovova detektoru jsou sbírány na fotodetektorech. Nejvíce používanými fotodetektory jsou fotonásobiče, fotodiody, pod něž spadají klasické fotodiody, lavinové fotodiody a SiPMs a hybridní fotonásobiče. Při výběru vhodného fotodetektoru pro danou aplikaci je třeba se ohlížet na jeho spektrální odezvu, vlastnosti dopadajícího světla a v neposlední řadě také na jeho cenu. V druhé kapitole této bakalářské práce jsou popsány základní veličiny potřebné k charakterizaci zmíněných druhů fotodetektorů, tyto fotodetektory jsou zde stručně popsány a na základě svých vlastností mezi sebou porovnány.

Dále je podrobněji popsán SiPM a vliv teploty na jeho provoz. V experimentu DUNE budou SiPMs provozovány v prostředí kapalného argonu, jež má velmi nízkou teplotu. Běžně se SiPMs při takto nízkých teplotách neprovozují, proto je potřeba znát, co lze v takovém prostředí od jejich chování přibližně očekávat.

V poslední kapitole jsou popsána provedená měření volt-ampérových charakteristik SiPMs při pokojové teplotě a v kapalném dusíku pro účely experimentu DUNE, která byla provedena na Fyzikálním ústavu AV ČR. Jsou zde uvedeny způsoby stanovení průrazného napětí a zhasacího odporu z oněch charakteristik.

Měření byla rozdělena do dvou fází. V první fázi se měřily charakteristiky 25 SiPMs dodaných samostatně, přičemž jsme obdrželi tři různé typy SiPMs, dva od výrobce HPK a jeden od výrobce FBK. Účelem této fáze bylo prozkoumat, jak se charakteristiky SiPMs chovají v prostředí kapalného dusíku. Měření probíhala nejprve při pokojové teplotě pro ověření údajů uvedených výrobcem, dále byla provedena při prvním ponoření do kapalného dusíku. Následně bylo s SiPMs provedeno 19 cyklů ponoření do kapalného dusíku. Při posledním cyklu byly jejich charakteristiky v kapalném dusíku změřeny znovu, a poté byly opět změřeny při pokojové teplotě. Cyklování z časových důvodů proběhlo pouze s vybranými konkrétními SiPMs od

výrobce HPK, s SiPMs od FBK cyklování prováděno nebylo.

Z výsledků průrazného napětí v obou prostředích před a po cyklování nepozorujeme v rámci směrodatné odchylky změnu jejich hodnot. Žádnou změnu v rámci směrodatné odchylky nepozorujeme ani pro hodnoty zhášecího odporu. Zhášecí odpor byl určen třemi způsoby. Dva způsoby spočívají v fitu naměřené závislosti lineární přímkou ve vybrané oblasti. Fitovaly se křivky I-V a V-I. Pro hodnoty fitu I-V křivky je oblast fitování lineární přímkou klíčová. Pro měření při pokojové teplotě je daná oblast lineární, což je požadováno a problém zde tedy nenastává. Naopak pro měření v kapalném dusíku oblast již zcela lineární není, dostáváme se do oblasti „kolene“ křivky, což výsledné hodnoty fitu nadhodnocuje. Pro porovnání jsem provedla fit naměřené křivky lineární přímkou ještě v oblasti vyšších napětí (mimo oblast kolene). Porovnáním hodnot fitů v daných oblastech se ukázalo, že pro měření při pokojové teplotě se hodnoty liší minimálně, oblast fitu byla v obou intervalech lineární a neovlivnila tedy výslednou hodnotu. V případě měření v kapalném dusíku se ale významně liší. Hodnoty získané z fitu oblasti vyšších napětí jsou výrazně nižší. Bylo by tedy nejspíše vhodné stanovit oblast fitu lineární přímkou v oblasti vyšších napětí. Stanovení hodnot zhášecího odporu z V-I křivky se provádělo pro srovnání hodnot dodaných výrobcí. Obě tyto metody stanovení zhášecího odporu jsou závislé na oblasti fitu lineární přímkou. Z toho důvodu jsem fitovala naměřená data ještě Shockleyho rovnicí ideální diody, která popisuje celou naměřenou křivku. Hodnoty zhášecích odporů získané z tohoto fitu jsou nejnižší oproti ostatním získaným hodnotám. Je to způsobeno tím, že zhášecí odpor získaný z fitu Shockleyho rovnicí v sobě nezahrnuje sériový odpor diody, na rozdíl od ostatních dvou způsobů. Tato metoda stanovení zhášecího odporu by tedy měla být nejpřesnější, avšak je důležité si uvědomit, že Shockleyho rovnice popisuje ideální diodu a má v sobě zahrnuté předpoklady, které nejsme schopni při měření zajistit.

Ve druhé fázi byly měřeny charakteristiky 120 SiPMs dodaných na 20 destičkách po šesti. Všechny dodané SiPMs byly jednoho typu od výrobce HPK. V této fázi bylo stěžejní porovnat rozptyl naměřených hodnot SiPMs umístěných na jedné destičce, jelikož takto uspořádané budou umístěny ve vzdáleném detektoru. Se všemi destičkami se provedla stejná měření jako s jednotlivými SiPMs v první fázi, až na měření při pokojové teplotě po cyklování, ta totiž nejsou pro účely DUNE důležitá. Hodnoty průrazných napětí v kapalném dusíku před a po cyklování zůstaly nezměněny. Zhášecí odpor jsem opět stanovila třemi již zmíněnými způsoby. Z histogramů poměrů zhášecích odporů získaných z fitu V-I křivky ku hodnotám z I-V křivky a Shockleyho rovnice lze pozorovat, že poměr je méně stabilní pro hodnoty získané z I-V křivky. Zde se opět naráží na problém fitované oblasti, která není v kapalném dusíku zcela lineární.

Rozptyl sledovaných hodnot na jednotlivých destičkách je vždy různý, s největší pravděpodobností bude nejvíce záviset na výrobní šarži jednotlivých SiPMs. Tento problém byl konzultován s výrobcí. Z jejich zpětné vazby vyplynulo, že by měli být schopni zajistit tyto rozptyly výrazně menší, než jsou ty současné.

Literatura

- [1] 1. MĚŘENÍ NA POLOVODIČOVÉ DIODĚ - PDF Free Download, nedatováno. [online]. [Viděno 12 červenec 2021]. Získáno z: <https://docplayer.cz/18179632-1-mereni-na-polovodicove-diode.html>
- [2] Fotodioda – Wikipedie, nedatováno. [online]. [Viděno 11 červenec 2021]. Získáno z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotodioda>
- [3] GERNDT, Josef, PRŮŠA, Petr, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA a JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ, 2011. Detektory ionizujícího záření. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 9788001047101.
- [4] GOLLA, Alberto, ACERBI, Fabio, CAPASSO, Massimo, MARCANTE, Marco, MAZZI, Alberto, PATERNOSTER, Giovanni, PIEMONTE, Claudio, REGAZZONI, Veronica a ZORZI, Nicola, 2019. NUV-Sensitive Silicon Photomultiplier Technologies Developed at Fondazione Bruno Kessler. Sensors (Basel, Switzerland). 14 leden 2019. Vol. 19, no. 2, p. 308. DOI 10.3390/s19020308.
- [5] MACKOWIAK, Verena, Jens PEUPELMANN a Anthony GORGES. NEP – Noise Equivalent Power [online]. In: . THORLABS [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/images/TabImages/Noise_Equivalent_Power_White_Paper.pdf
- [6] K.K, Hamamatsu Photonics, nedatováno. A technical guide to silicon photomultipliers (MPPC) . [online]. [Viděno 11 červenec 2021 a]. Získáno z: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-note/sipm-mppc-technical-note/section4.html>
- [7] K.K, Hamamatsu Photonics, nedatováno. How does temperature affect the performance of an SiPM? [online]. [Viděno 11 červenec 2021 b]. Získáno z: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-note/sipm-temperature-performance/index.html>
- [8] K.K, Hamamatsu Photonics, nedatováno. Measuring the electrical and optical properties of silicon photomultipliers. [online]. [Viděno 11 červenec 2021 c]. Získáno z: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-note/electrical-optical-sipm-properties/index.html>
- [9] K.K, Hamamatsu Photonics, nedatováno. The WITSS\$ guide to selecting a photodetector. [online]. [Viděno 11 červenec 2021 d]. Získáno z:

<https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-note/WITS-guide-detector-selection/index.html>

- [10] KLANNER, Robert, 2019. Characterisation of SiPMs. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 11 květen 2019. Vol. 926, p. 36–56. DOI 10.1016/j.nima.2018.11.083.
- [11] MONTANARI, Alessandro a TERRANOVA, Francesco, 04/20. Planning for the SiPM tests in the DUNE pre-production phase. In: . INFN Sez. di Bologna. 04/20. p. 8.
- [12] Working Principle of a TPC, nedatováno. [online]. [Viděno 20 červenec 2021]. Získáno z: <https://www.lctpc.org/e8/e57671>
- [13] ABI, B., ACCIARRI, R., ACERO, M.A., et al., 2020. Volume IV. The DUNE far detector single-phase technology. Journal of Instrumentation. 27 srpen 2020. Vol. 15, no. 08, p. T08010–T08010. DOI 10.1088/1748-0221/15/08/T08010.
- [14] K.K, Hamamatsu Photonics, nedatováno. What is an SiPM and how does it work? [online]. [Viděno 24 červenec 2021]. Získáno z: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-note/how-sipm-works/index.html>
- [15] BELAS, E. a P. MORAVEC. Polovodičové detektory záření [online]. Praha, 2011, 1.1.2011 [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/semicond/files/courses/Belasdetekce.pdf>
- [16] Photomultiplier tube. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-7-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier_tube

A. Příloha

destička_#SiPM	V_{br} (V)					
	v teple před cyklováním		v LN_2 před cyklováním		v LN_2 po cyklování	
1_1	52,35	52,40	42,35	42,35	42,35	42,35
1_2	51,65	51,71	41,65	41,63	41,55	41,59
1_3	52,45	52,51	42,45	42,43	42,45	42,43
1_4	52,35	52,42	42,45	42,46	42,45	42,46
1_5	52,35	52,39	42,35	42,39	42,35	42,38
1_6	52,45	52,52	42,55	42,56	42,55	42,56
2_1	51,95	51,99	42,05	42,05	42,05	42,05
2_2	52,45	52,48	42,45	42,49	42,45	42,49
2_3	52,15	52,19	42,05	42,08	42,05	42,09
2_4	51,75	51,82	41,75	41,74	41,75	41,74
2_5	52,35	52,44	42,35	42,37	42,35	42,37
2_6	51,85	51,88	41,75	41,74	41,75	41,74
3_1	52,25	52,33	42,35	42,34	42,25	42,29
3_2	51,85	51,94	41,85	41,86	41,85	41,86
3_3	52,15	52,20	42,15	42,15	42,15	42,15
3_4	52,45	52,51	42,45	42,46	42,45	42,46
3_5	52,55	52,58	42,45	42,47	42,45	42,47
3_6	52,25	52,34	42,35	42,38	42,35	42,38
4_1	52,55	52,63	42,55	42,56	42,55	42,56
4_2	52,35	52,40	42,45	42,46	42,45	42,46
4_3	51,95	51,99	42,05	42,06	42,05	42,06
4_4	52,35	52,41	42,45	42,47	42,45	42,48
4_5	52,15	52,20	42,15	42,14	42,15	42,15
4_6	51,75	51,78	41,65	41,66	41,65	41,67
5_1	51,95	52,00	42,05	42,05	42,05	42,05
5_2	52,35	52,39	42,45	42,48	42,45	42,48
5_3	52,05	52,10	42,05	42,06	42,05	42,06
5_4	52,15	52,20	42,15	42,16	42,15	42,16
5_5	51,95	51,99	41,95	41,95	41,95	41,95
5_6	52,45	52,50	42,45	42,45	42,45	42,45
6_1	52,05	52,12	42,05	42,06	42,05	42,06
6_2	52,25	52,28	42,15	42,19	42,15	42,19
6_3	51,85	51,88	41,75	41,79	41,75	41,79
6_4	52,05	52,11	42,05	42,07	42,05	42,08
6_5	52,25	52,26	42,05	42,08	42,05	42,08
6_6	52,35	52,45	42,55	42,55	42,55	42,55
7_1	52,35	52,41	42,35	42,36	42,35	42,35
7_2	51,95	52,02	41,85	41,89	41,85	41,88
7_3	51,95	52,04	42,05	42,05	42,05	42,05
7_4	51,95	52,00	41,95	41,99	41,95	41,98
7_5	52,35	52,42	42,45	42,48	42,45	42,48

7_6	51,65	51,68	41,65	41,66	41,65	41,66
8_1	52,35	52,43	42,55	42,54	42,45	42,49
8_2	52,05	52,08	42,15	42,14	42,15	42,14
8_3	52,35	52,39	42,45	42,47	42,45	42,47
8_4	51,55	51,63	41,65	41,63	41,55	41,59
8_5	51,65	51,69	41,65	41,67	41,65	41,66
8_6	51,95	52,04	41,95	41,96	41,95	41,96
9_1	51,55	51,60	41,65	41,64	41,65	41,64
9_2	52,35	52,38	42,35	42,37	42,35	42,37
9_3	52,55	52,57	42,45	42,49	42,45	42,49
9_4	51,65	51,69	41,65	41,65	41,65	41,65
9_5	51,85	51,90	41,85	41,88	41,85	41,88
9_6	51,75	51,84	41,75	41,77	41,75	41,77
10_1	52,45	52,50	42,45	42,48	42,45	42,48
10_2	51,65	51,69	41,65	41,66	41,65	41,66
10_3	52,25	52,31	42,35	42,34	42,35	42,34
10_4	51,85	51,91	41,85	41,84	41,85	41,84
10_5	52,35	52,39	42,45	42,47	42,45	42,46
10_6	52,25	52,28	42,35	42,38	42,35	42,37
11_1	52,25	52,30	42,35	42,36	42,35	42,36
11_2	52,25	52,32	42,45	42,45	42,45	42,44
11_3	52,05	52,13	42,25	42,26	42,25	42,26
11_4	51,65	51,71	41,65	41,67	41,65	41,67
11_5	52,25	52,25	42,15	42,17	42,15	42,17
11_6	51,85	51,88	41,75	41,78	41,75	41,78
12_1	52,05	52,14	42,15	42,15	42,15	42,15
12_2	51,85	51,89	41,85	41,87	41,85	41,88
12_3	52,45	52,49	42,45	42,47	42,45	42,47
12_4	51,65	51,73	41,75	41,75	41,75	41,75
12_5	52,35	52,40	42,35	42,36	42,35	42,36
12_6	51,75	51,80	41,75	41,78	41,75	41,78
13_1	52,45	52,51	42,45	42,48	42,45	42,48
13_2	51,75	51,81	41,75	41,78	41,75	41,78
13_3	52,05	52,10	42,15	42,17	42,15	42,17
13_4	52,35	52,42	42,55	42,54	42,55	42,54
13_5	51,85	51,91	41,85	41,89	41,85	41,89
13_6	51,65	51,68	41,65	41,64	41,65	41,64
14_1	52,05	52,07	42,05	42,06	42,05	42,06
14_2	51,75	51,79	41,75	41,76	41,75	41,77
14_3	51,95	52,01	41,95	41,97	41,95	41,97
14_4	51,75	51,80	41,75	41,79	41,75	41,79
14_5	52,35	52,43	42,45	42,46	42,45	42,46
14_6	51,65	51,68	41,65	41,68	41,65	41,68
15_1	51,65	51,68	41,85	41,86	41,85	41,86
15_2	51,75	51,79	41,95	41,98	41,95	41,98
15_3	51,75	51,79	41,95	41,94	41,95	41,94
15_4	51,75	51,81	41,95	41,95	41,95	41,95
15_5	51,95	51,99	42,05	42,06	42,05	42,06
15_6	52,45	52,49	42,55	42,58	42,55	42,57
16_1	51,75	51,82	41,75	41,77	41,75	41,77
16_2	51,85	51,90	41,85	41,88	41,85	41,87
16_3	51,85	51,91	41,85	41,85	41,85	41,85
16_4	51,75	51,79	41,75	41,75	41,75	41,75
16_5	51,75	51,84	41,95	41,96	41,95	41,95

16_6	51,75	51,78	41,85	41,88	41,85	41,88
17_1	51,75	51,81	41,85	41,84	41,75	41,80
17_2	51,75	51,81	41,75	41,80	41,75	41,80
17_3	51,65	51,73	41,95	41,93	41,95	41,93
17_4	51,65	51,74	41,95	41,93	41,95	41,94
17_5	51,65	51,70	41,85	41,88	41,85	41,88
17_6	51,85	51,91	41,85	41,87	41,85	41,87
18_1	51,65	51,74	41,75	41,76	41,75	41,76
18_2	51,75	51,81	41,75	41,77	41,75	41,77
18_3	51,65	51,71	41,75	41,74	41,75	41,74
18_4	51,75	51,80	41,75	41,79	41,75	41,79
18_5	51,75	51,82	41,85	41,86	41,85	41,85
18_6	51,85	51,86	41,85	41,86	41,85	41,86
19_1	51,45	51,50	41,55	41,58	41,55	41,58
19_2	51,45	51,53	41,65	41,65	41,65	41,64
19_3	51,45	51,53	41,55	41,58	41,55	41,58
19_4	51,55	51,61	41,65	41,65	41,65	41,65
19_5	51,45	51,49	41,55	41,54	41,55	41,54
19_6	51,75	51,82	41,85	41,85	41,85	41,85
20_1	51,95	51,98	41,75	41,78	41,75	41,77
20_2	51,65	51,71	41,55	41,58	41,55	41,58
20_3	51,65	51,72	41,55	41,57	41,55	41,57
20_4	51,65	51,72	41,55	41,57	41,55	41,56
20_5	51,65	51,70	41,55	41,56	41,55	41,56
20_6	51,55	51,63	41,55	41,57	41,55	41,57
průměr	51,97	52,03	42,01	42,03	42,01	42,02
σ	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
σ_{rel}	0,006	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007

Tabulka A.1: Průrazná napětí 120 SiPMs z druhé fáze měření

	$R_Q (\Omega)$								
	před cyklováním - teplo			před cyklováním - LN ₂			po cyklování - LN ₂		
	V-I	Shockley	I-V	V-I	Shockley	I-V	V-I	Shockley	I-V
1_1	93,18	—	—	356,51	310,75	490,71	354,08	310,59	490,59
1_2	92,84	—	—	356,53	309,20	497,70	356,40	309,15	497,63
1_3	90,60	—	—	340,10	293,40	463,12	340,04	293,46	463,11
1_4	93,97	—	—	349,65	304,87	489,62	350,59	304,98	489,53
1_5	94,87	—	—	348,49	304,10	486,80	348,89	304,23	486,91
1_6	92,93	—	—	356,54	310,26	491,33	357,26	310,12	491,28
2_1	90,42	—	—	352,16	303,21	483,51	350,65	303,39	483,78
2_2	93,21	—	—	354,06	307,85	490,68	354,04	308,19	490,91
2_3	95,54	—	—	381,25	334,05	517,96	381,97	334,23	518,60
2_4	95,14	—	—	377,31	328,76	520,16	376,99	329,50	520,61
2_5	94,36	—	—	369,57	322,83	504,68	369,38	322,97	505,04
2_6	93,04	—	—	366,17	315,66	494,61	365,95	315,82	494,76
3_1	94,30	—	—	371,13	324,89	504,12	369,51	324,53	503,56
3_2	93,85	—	—	368,11	319,58	500,78	367,54	319,19	500,35
3_3	93,59	—	—	359,38	313,05	496,04	357,58	312,78	495,50
3_4	91,26	—	—	343,17	296,34	468,76	341,47	296,13	468,53
3_5	91,19	—	—	343,16	296,79	470,64	342,42	296,69	470,25
3_6	93,18	—	—	348,23	302,24	482,89	347,35	302,03	482,35
4_1	90,90	—	—	343,10	298,07	470,54	342,84	298,06	470,65

4_2	92,45	—	—	347,69	302,23	480,65	348,08	302,41	480,84
4_3	90,70	—	—	353,39	305,00	484,62	354,27	305,16	484,40
4_4	95,01	—	—	354,79	310,03	496,01	355,38	310,16	495,87
4_5	95,68	—	—	381,17	333,98	520,02	382,34	334,23	519,83
4_6	95,43	—	—	376,64	329,17	522,84	376,19	329,16	522,89
5_1	93,19	—	—	366,45	318,21	501,70	365,22	318,68	501,87
5_2	94,70	—	—	356,99	312,59	499,17	356,05	313,00	499,46
5_3	95,41	—	—	383,32	334,11	519,85	382,95	334,34	520,05
5_4	94,50	—	—	374,47	325,96	507,92	373,39	325,99	508,32
5_5	93,58	—	—	362,69	315,57	500,74	362,24	315,72	501,27
5_6	91,98	—	—	344,81	299,15	475,57	343,16	299,25	476,05
6_1	94,54	—	—	373,81	326,96	508,17	375,44	327,11	508,26
6_2	93,25	—	—	363,94	315,82	494,35	364,66	315,75	494,35
6_3	93,93	—	—	365,43	318,25	504,63	364,39	318,05	504,73
6_4	92,30	—	—	352,96	305,19	485,43	352,48	305,13	485,54
6_5	92,97	—	—	361,14	311,83	488,67	360,48	311,70	488,73
6_6	92,87	—	—	354,49	306,03	487,67	352,19	305,93	487,43
7_1	93,22	—	—	361,06	314,45	492,33	359,71	314,68	492,59
7_2	93,21	—	—	362,88	313,17	491,37	362,24	313,31	491,72
7_3	92,85	—	—	367,04	315,53	500,55	363,57	315,63	500,61
7_4	94,11	—	—	375,37	324,84	512,04	373,80	324,93	512,16
7_5	95,80	—	—	364,34	317,56	508,90	363,63	317,55	508,92
7_6	91,96	—	—	364,02	312,61	505,22	361,38	312,71	505,30
8_1	93,24	—	—	354,42	310,31	492,14	358,13	310,67	492,30
8_2	94,89	—	—	374,73	327,00	515,48	377,00	327,27	515,44
8_3	96,53	—	—	366,23	322,39	515,40	367,82	322,76	515,59
8_4	95,93	—	—	380,79	334,13	530,11	383,00	334,32	530,24
8_5	92,41	—	—	360,17	310,57	502,35	359,97	310,69	502,35
8_6	94,97	—	—	376,82	327,54	510,10	377,90	327,85	510,18
9_1	94,46	—	—	373,55	326,51	520,93	372,11	326,19	520,26
9_2	94,50	—	—	369,62	322,74	504,38	370,52	322,45	504,06
9_3	93,28	—	—	359,53	311,77	490,41	359,95	311,60	489,88
9_4	93,78	—	—	362,53	315,29	508,00	362,85	315,10	507,44
9_5	92,97	—	—	355,38	308,76	491,43	356,18	308,53	491,08
9_6	93,30	—	—	360,03	312,27	490,74	361,26	312,14	490,39
10_1	92,67	—	—	353,10	308,26	485,87	355,25	308,37	485,69
10_2	92,36	—	—	353,50	306,49	498,58	354,85	306,45	498,14
10_3	92,23	—	—	347,13	301,50	480,78	348,35	301,42	480,36
10_4	92,23	—	—	356,57	306,35	483,74	356,17	306,22	483,32
10_5	93,97	—	—	363,81	316,19	501,69	364,96	316,18	501,56
10_6	97,07	—	—	370,53	326,84	526,40	369,10	326,65	525,96
11_1	94,68	—	—	366,07	321,02	508,21	365,67	319,51	506,82
11_2	94,53	—	—	369,09	323,29	509,99	369,88	322,07	508,50
11_3	97,02	—	—	372,78	329,46	530,89	373,08	328,27	529,70
11_4	96,77	—	—	384,27	339,51	534,38	386,77	338,96	533,15
11_5	95,12	—	—	368,59	324,00	509,13	371,28	323,68	507,99
11_6	92,00	—	—	356,74	309,92	481,83	359,46	309,69	480,61
12_1	95,03	—	—	369,06	325,45	507,87	367,44	324,89	506,99
12_2	89,90	—	—	344,19	295,92	460,12	342,73	295,43	459,04
12_3	92,60	—	—	353,54	306,62	484,23	351,99	306,06	483,24
12_4	89,56	—	—	341,15	291,20	477,09	339,27	290,56	475,97
12_5	92,61	—	—	358,44	308,54	483,65	356,47	307,97	482,77
12_6	89,93	—	—	343,59	294,03	466,96	341,96	293,48	465,98
13_1	92,13	—	—	349,42	304,54	477,44	348,43	303,93	476,31

13_2	89,69	—	—	341,40	291,42	465,08	339,64	290,80	464,06
13_3	95,28	—	—	372,21	324,14	511,92	370,95	323,58	510,80
13_4	93,98	—	—	367,14	318,40	503,57	366,02	317,83	502,66
13_5	96,49	—	—	383,14	336,03	526,48	383,27	335,59	525,70
13_6	96,63	—	—	386,31	338,99	534,75	386,43	338,51	533,88
14_1	97,14	—	—	381,44	336,66	526,10	380,07	336,22	525,43
14_2	96,39	—	—	383,92	337,10	529,10	381,76	336,61	528,36
14_3	95,27	—	—	372,76	326,26	513,33	370,82	325,70	512,52
14_4	90,11	—	—	345,63	295,58	464,94	343,71	295,03	464,16
14_5	93,60	—	—	354,80	308,46	487,88	353,74	308,08	487,02
14_6	89,79	—	—	339,71	290,61	475,32	338,37	290,14	474,58
15_1	100,25	—	—	402,55	357,38	568,07	401,83	356,99	567,30
15_2	98,20	—	—	398,91	346,27	551,29	394,41	345,76	550,62
15_3	98,64	—	—	398,54	347,99	546,18	397,48	347,67	545,34
15_4	97,82	—	—	397,01	346,33	541,29	396,48	345,90	540,61
15_5	94,60	—	—	372,42	322,84	509,66	373,60	322,45	509,04
15_6	93,32	—	—	358,47	313,01	496,29	362,02	312,95	495,75
16_1	93,51	—	—	366,90	319,14	494,18	365,28	318,78	493,75
16_2	95,94	—	—	385,87	335,40	519,47	384,77	335,07	518,94
16_3	95,57	—	—	382,21	332,47	515,26	381,77	332,11	514,88
16_4	94,68	—	—	377,44	326,76	507,08	376,53	326,42	506,44
16_5	99,18	—	—	404,68	353,51	553,58	404,01	353,01	552,80
16_6	98,17	—	—	400,76	349,52	545,82	398,79	349,15	545,03
17_1	97,07	—	—	385,40	338,67	528,62	383,88	338,38	528,23
17_2	98,06	—	—	387,98	340,84	532,90	388,07	340,61	532,47
17_3	96,77	—	—	393,35	341,32	532,36	392,71	341,06	531,75
17_4	96,23	—	—	391,97	338,97	527,11	389,14	338,69	526,39
17_5	94,49	—	—	379,95	328,44	503,13	379,49	328,14	502,70
17_6	91,69	—	—	359,32	308,52	473,57	358,51	308,33	472,97
18_1	94,37	—	—	374,98	326,33	501,89	370,27	325,71	501,19
18_2	95,67	—	—	384,14	333,15	516,47	381,62	332,59	515,79
18_3	96,27	—	—	388,42	337,97	521,57	385,43	337,63	521,03
18_4	96,73	—	—	391,18	340,48	525,92	386,44	339,91	525,07
18_5	96,84	—	—	390,49	340,28	528,93	387,04	340,14	528,72
18_6	96,89	—	—	391,43	340,01	529,34	383,88	339,22	528,56
19_1	93,84	87,17	92,17	372,41	323,65	516,92	371,95	323,24	516,14
19_2	94,96	88,49	93,44	379,47	331,24	522,21	379,56	330,85	521,28
19_3	96,77	90,06	95,37	387,20	339,87	532,69	389,40	339,02	531,86
19_4	98,41	91,33	97,03	390,44	344,44	539,14	393,23	344,10	538,18
19_5	97,62	90,89	96,34	392,67	343,63	538,95	392,56	343,27	537,92
19_6	92,80	86,72	91,47	363,59	317,64	485,33	366,17	317,45	484,39
20_1	94,09	87,75	92,65	381,11	330,93	506,07	373,15	329,97	505,94
20_2	96,43	89,26	94,97	390,81	341,95	531,75	383,95	341,15	531,46
20_3	96,37	89,42	94,95	391,30	342,63	533,59	385,19	341,83	533,22
20_4	96,85	89,86	95,45	393,08	343,80	538,59	387,07	343,27	538,54
20_5	96,15	89,45	94,81	389,15	341,25	535,96	385,93	340,53	535,70
20_6	94,91	88,23	93,54	382,49	334,08	528,92	376,59	354,68	529,04
průměr	95,77	89,05	94,35	368,96	321,14	505,93	368,17	321,08	505,54
σ	1,59	1,36	1,63	16,15	15,47	22,08	15,70	15,64	22,01
σ_{rel}	0,017	0,015	0,017	0,044	0,048	0,044	0,043	0,049	0,044

Tabulka A.2: Zhášecí odpory 120 SiPMs z druhé fáze měření