

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO  
MEDICINSKA FIZIKA

Gašper Zajc

**OKREVANJE SILICIJEVIH  
FOTOPOMNOŽEVALK PO OBSEVANJU Z  
NEVTRONI**

Magistrsko delo

MENTOR: izr. prof. dr. Rok Pestotnik

Ljubljana, 2020



## Zahvala

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Roku Pestotniku za vso pridobljeno znanje, pomoč ter koristne nasvete, brez katerih to delo ne bi bilo mogoče. Zahvaljujem se tudi staršem ter bližnjim, ki so mi omogočili študij ter me med njim izredno podpirali.



# Okrevanje silicijevih fotopomnoževalk po obsevanju z nevtroni

## IZVLEČEK

Silicijeve fotopomnoževalke so polprevodniški detektorji svetlobe, sposobi zaznavati posamezne fotone. Sestavljene so iz mreže plazovnih fotodiod. So veliko manjše od običajnih fotopomnoževalk, neobčutljive na magnetno polje, imajo nižjo ceno izdelave ter delujejo pri manjših napetostih. Silicijeve fotopomnoževalke si želimo uporabljati tudi v sevalnih okoljih, kot so eksperimenti v fiziki visokih energij. Na področju vpliva sevalnih poškodb na detekcijo posameznih fotonov s silicijevimi fotopomnoževalkami še ni bilo narejenih veliko študij. V tej magistrski nalogi sem raziskoval vpliv obsevanja silicijevih fotopomnoževalk z nevtroni ter vpliv segrevanja silicijevih fotopomnoževalk na odpravo sevalnih poškodb. Raziskoval sem vpliv obsevanja na napetost praga ter na sposobnost zaznave posameznega fotona. Po obsevanju smo vsako celico segrevali pet zaporednih tednov pri temperaturi  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ter po vsakem tednu spremljali njihovo okrevanje.

**Ključne besede:** silicijeve fotopomnoževalke, sevalne poškodbe, nevtroni, okrevanje



## **Silicon photomultipliers recovery after neutron irradiation**

### **ABSTRACT**

Silicon photomultipliers are semiconductor light detectors, capable of detecting single photons. They are made of a matrix of single-photon avalanche diodes connected in parallel. They are a lot smaller than normal photomultiplier tubes, insensitive to magnetic field, have lower production prices and can be operated at lower voltages. There is a tendency for silicon photomultipliers to be used in radiation environments such as high energy physics experiments. In the field of the influence of radiation damage on the detection of individual photons with silicon photomultipliers, not many studies have been done yet. In this masters thesis, I investigated the influence of irradiation of silicon photomultipliers with neutrons and the influence of heating silicon photomultipliers on the elimination of radiation damage. I investigated the effect of radiation on the breakdown voltage and on the ability to detect an individual photon. After irradiation, each cell was heated at 100 °C for five consecutive weeks and monitored the recovery of silicon photomultipliers after each week.

**Keywords: silicon photomultipliers, radiation damage, neutrons, thermal annealing**





# Kazalo

Seznam slik . . . . .	xi
Seznam tabel . . . . .	xv
Seznam kratic in simbolov . . . . .	xvii
<b>1 Uvod . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Silicijevi fotodetektorji . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1 Interakcije fotonov s snovjo . . . . .	3
2.1.1 Fotoelektrični pojav . . . . .	4
2.1.2 Comptonsko sipanje . . . . .	4
2.1.3 Tvorba parov . . . . .	5
2.2 Polprevodniški fotodetektorji . . . . .	5
2.2.1 Energijski nivoji v trdni snovi . . . . .	5
2.2.2 Polprevodniki . . . . .	6
2.3 Silicijeve fotopomnoževalke . . . . .	10
<b>3 Sevalne poškodbe polprevodniških detektorjev . . . . .</b>	<b>17</b>
3.1 Sevalne poškodbe SiPM . . . . .	20
3.2 Izboljšanje sevalne odpornosti polprevodnikov . . . . .	23
3.3 Okrevanje polprevodniških detektorjev pri povišani temperaturi . . . . .	23
<b>4 Postavitev eksperimenta . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>5 Rezultati . . . . .</b>	<b>35</b>
5.1 Pragovna napetost v odvisnosti od temperature . . . . .	35
5.2 Meritev oblike signala . . . . .	43
5.3 Meritev ojačenja SiPM . . . . .	51
<b>6 Zaključek . . . . .</b>	<b>59</b>
Literatura . . . . .	61
Dodatek A Vse meritve oblike signala . . . . .	65



# Seznam slik

2.1	Odvisnost masnega atenuacijskega koeficienta fotona v siliciju od energije . . . . .	4
2.2	Comptonovo sipanje . . . . .	5
2.3	Energijski nivoji v trdni snovi . . . . .	6
2.4	Prevajanje polprevodnika zaradi gibanja vrzeli . . . . .	6
2.5	n-tip in p-tip polprevodnika . . . . .	7
2.6	IV krivulja polprevodne diode . . . . .	8
2.7	Ojačanje APD ter SPAD . . . . .	9
2.8	Zgradba APD oz. SPAD detektorja . . . . .	9
2.9	Odvisnost $\epsilon_{Geiger}$ od napetosti nad pragom . . . . .	10
2.10	Kvantni izkoristek SiPM . . . . .	11
2.11	Zapolnitveno razmerje v odvisnosti od velikosti SiPM . . . . .	12
2.12	Učinkovitost zaznavanja fotonov . . . . .	12
2.13	Procesi, ki povzročajo temni šum . . . . .	14
2.14	Zakasnen signal . . . . .	15
2.15	Optični presluh . . . . .	16
3.1	Nastanek gručastih poškodb zaradi PKA . . . . .	18
3.2	Sevalne poškodbe v energijski vrzeli polprevodnika . . . . .	19
3.3	Izguba sposobnosti detekcije posameznega fotona po obsevanju SiPM . . . . .	20
3.4	Kapacitivnost ter upornost SiPM po obsevanju z nevtroni . . . . .	22
3.5	Vrednost pragovne napetosti KETEK po obsevanju z različnimi fluencami nevtronov . . . . .	22
3.6	Odvisnost temnega toka od časa okrevanja SiPM pri povišani temperaturi . . . . .	24
3.7	Odvisnost temnega toka od časa okrevanja APD pri sobni temperaturi . . . . .	25
4.1	Odvisnost temperature SiPM od napetosti . . . . .	28
4.2	Odvisnost temperature SiPM od časa . . . . .	28
4.3	Shematski prikaz začetnega eksperimenta . . . . .	29
4.4	Shema postavitve SiPM, elektronske tiskanine, uporovnih grelcev, napetostnih vodnikov, bloka aluminija, temperaturnega senzorja ter optičnega vodnika v posodici iz stiropora . . . . .	30
4.5	Grelec SiPM, elektronska tiskanina, optični vodnik ter napetostni vodniki . . . . .	31
4.6	Posodica iz stiropora za zagotavljanje termične izolacije. . . . .	31
4.7	Shematski prikaz postavitve eksperimenta. . . . .	32
4.8	Posoda s tekočim dušikom . . . . .	33
4.9	Odvisnost temperature SiPM od časa . . . . .	33
5.1	Določanje $V_{prag}$ iz $I(V)$ karakteristike SiPM . . . . .	35

5.2	$I(V)$ karakteristika neobsevane SiPM Hamamatsu 3050PE . . . . .	36
5.3	$I(V)$ karakteristika Hamamatsu 3050PE SiPM obsevane s $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . . . . .	37
5.4	$I(V)$ karakteristika Hamamatsu 3050PE SiPM obsevane s $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . . . . .	37
5.5	Odvisnost toka (I) od $V_{overvoltage}$ neobsevane SiPM Hamamatsu 3050PE	38
5.6	Odvisnost toka (I) od $V_{overvoltage}$ Hamamatsu 3050PE SiPM obsevane s $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . . . . .	38
5.7	Odvisnost toka (I) od $V_{overvoltage}$ Hamamatsu 3050PE SiPM obsevane s $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . . . . .	39
5.8	Odvisnost $V_{prag}$ od $T$ . . . . .	40
5.9	Primerjava odvisnosti $V_{prag}$ od $T$ za neobsevano ter obe obsevani celici MicroFJ-30035 pred segrevanjem. . . . .	40
5.10	Primerjava odvisnosti $V_{prag}$ od $T$ za neobsevano ter obe obsevani celici MicroFJ-30035 pred in po segrevanju. . . . .	41
5.11	Primerjava odvisnosti $V_{prag}$ od $T$ za neobsevano ter obe obsevani celici Hamamatsu 3050PE pred segrevanjem. . . . .	41
5.12	Primerjava odvisnosti $V_{prag}$ od $T$ za neobsevano ter obe obsevani celici Hamamatsu 3050PE pred in po segrevanju. . . . .	42
5.13	Zajem signala SiPM z osciloskopom . . . . .	43
5.14	Signal neobsevane Hamamatsu 3050PE . . . . .	44
5.15	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . . .	44
5.16	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 5 tednih segrevanja . . . . .	45
5.17	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . . .	45
5.18	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 5 tednih segrevanja . . . . .	46
5.19	Signal neobsevane MicroFJ-30035 . . . . .	46
5.20	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . . . . .	47
5.21	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 5 tednih segrevanja . . . . .	47
5.22	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . . . . .	48
5.23	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 5 tednih segrevanja . . . . .	48
5.24	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ter $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ pri temperaturi $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ po 5 tednih segrevanja . . .	49
5.25	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ter $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ pri temperaturi $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ po 5 tednih segrevanja . . . . .	50
5.26	Oblika signala zajeta z DRS4 . . . . .	51
5.27	Primer QDC meritve . . . . .	52
5.28	QDC meritev pri različnih intenzitetah vpadle svetlobe . . . . .	52
5.29	QDC meritev pri različnih $V_{overvoltage}$ . . . . .	53
5.30	Določanje ojačenja iz QDC meritve . . . . .	54
5.31	Ojačanje MicroFJ-30035 . . . . .	55
5.32	Ojačanje Hamamatsu 3050PE . . . . .	55
5.33	Ojačanje MicroFJ-30035 pred obsevanjem in po koncu segrevanja . .	56
5.34	Ojačanje Hamamatsu 3050PE pred obsevanjem in po koncu segrevanja	56

5.35	Primerjava velikosti prve doline proti prvemu vrhu QDC meritve Hamamatsu 3050PE . . . . .	57
5.36	Primerjava velikosti prve doline proti prvemu vrhu QDC meritve MicroFJ-30035 . . . . .	58
A.1	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 1 tednu segrevanja . . . . .	65
A.2	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 2 tednih segrevanja . . . . .	66
A.3	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 3 tednih segrevanja . . . . .	66
A.4	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 4 tednih segrevanja . . . . .	67
A.5	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 1 tednu segrevanja . . . . .	67
A.6	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 2 tednih segrevanja . . . . .	68
A.7	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 3 tednih segrevanja . . . . .	68
A.8	Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 4 tednih segrevanja . . . . .	69
A.9	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 1 tednu segrevanja . . . . .	69
A.10	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 2 tednih segrevanja . . . . .	70
A.11	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 3 tednih segrevanja . . . . .	70
A.12	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ po 4 tednih segrevanja . . . . .	71
A.13	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 1 tednu segrevanja . . . . .	71
A.14	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 2 tednih segrevanja . . . . .	72
A.15	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 3 tednih segrevanja . . . . .	72
A.16	Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ po 4 tednih segrevanja . . . . .	73



# Seznam tabel

3.1	Kinematične lastnosti 1 MeV delcev ter silicijevih atomov v kristalu silicija. . . . .	19
4.1	Silicijeve fotopomnoževalke uporabljene pri meritvah . . . . .	34
4.2	Karakteristike Hamamatsu 3050PE . . . . .	34
4.3	Karakteristike MicroFJ-30035 . . . . .	34





# Seznam kratic in simbolov

## Kratice

**APD** Avalanche photodiode - plazovna fotodioda

**F** Fill factor - zapolnitveno razmerje

**PDE** Photon detection efficiency - učinkovitost zaznave fotona

**PMT** Photomultiplier tube - fotopomnoževalka

**QE** Quantum efficiency - kvantni izkoristek

**SiPM** Silicon photomultiplier - silicijeva fotopomnoževalka

**SPAD** Single photon avalanche diode - plazovne fotodiode sposobne detekcije posameznega fotona



# Poglavje 1

## Uvod

Potrebe po detektiranju svetlobe različne intenzitete ter valovnih dolžin so vedno večje, kar spodbuja razvoj in izboljšavo različnih svetlobnih detektorjev. V medicini ter tehniki lahko na podlagi detekcije X-žarkov skonstruiramo sliko notranjosti pacienta ali objekta. V astrofiziki detektiramo svetlobo zvezd oddaljenih tisoče svetlobnih let. Pri fiziki osnovnih delcev pa nas zanimajo fotoni emitirani pri trku delcev.

Najpogosteje uporabljan detektor za detekcijo fotonov svetlobe v vidnem in ultravijoličnem delu spektra je fotopomnoževalka (*ang. Photomultiplier tube* - PMT). Deluje na principu fotoefekta. Foton vpade na fotokatodo, ki emitira fotoelektrone, te z električno napetostjo pospešimo do dinode kjer se po trku emitira do 10 sekundarnih elektronov. Te pospešimo do naslednje dinode, kjer se multiplikacija ponovi. Po seriji dinod tako dobimo veliko število elektronov, ki jih na zadnji anodi zaznamo kot električni tok. Fotokatoda, dinodna veriga ter anoda so vse zaprte v evakuiranem ohišju. Zaradi vakuuma je delovanje fotopomnoževalke stabilnejše, saj sekundarni elektroni ne trkajo z molekulami plina, hkrati pa je izdelava evakuiranega detektorja zapletenejša.

Svetlobni senzorji, ki v zadnjem času zaradi svoje majhnosti, neobčutljivosti na magnetno polje ter veliko manjše napetosti, potrebne za delovanje, nadomeščajo PMT, so silicijeve fotopomnoževalke (SiPM). SiPM je sestavljen iz mreže plazovnih fotodiod, ki lahko detektirajo posamezen foton (*ang. Single photon avalanche diode* - SPAD) [1]. Foton, ki vstopi v diodo, preko fotoelektričnega pojava izbije elektron, kar povzroči nastanek para elektron-vrzel. Pare elektron-vrzel pospešimo z električno napetostjo na diodi. Pri tem se pospešijo in med trki ustvarjajo druge pare elektron-vrzel. Tako nastane električni tok, ki ga lahko zaznamo. SiPM se, kot svetlobni detektor, uporablja tudi v sevalnih okoljih, kot so na primer eksperimenti v fiziki visokih energij. ATLAS je največji detektor delcev v velikem hadronskem trkalniku (*ang. Large hadron collider* - LHC). Pomemben sestavni del detektorja je kalorimeter, ki meri energijo delcev, ki nastanejo ob trku. Silicijeve fotopomnoževalke so eden izmed sestavnih delov kalorimetra [2].

V tem magistrskem delu bom raziskoval vpliv obsevanja z nevtroni na delovanje SiPM ter vpliv segrevanja po obsevanju na okrevanje sevalnih poškodb. V drugem poglavju bom opisal princip delovanja polprevodniških fotodetektorjev. V podpoglavju 2.3 bom posebej opisal silicijeve fotopomnoževalke. V tretjem poglavju bom opisal poškodbe, ki jih utрпи SiPM v sevalnih okoljih. Silicijeve fotopomnoževalke uporabljamo v najrazličnejših okoljih, kjer nanje vpadajo najrazličnejši delci, od fo-

## Poglavje 1. Uvod

---

tonov, protonov, elektronov, nevtronov do težjih hadronov. V podpoglavju 3.1 bom opisal sevalne poškodbe, ki jih povzročijo različni delci ter kako sevalne poškodbe vplivajo na delovanje SiPM. V četrtem poglavju bom opisal eksperimentalno delo, postavitev eksperimenta ter meritve. V petem poglavju so predstavljeni rezultati dobljenih meritev. Šesto poglavje je namenjeno zaključku, v katerem povzamemo vse rezultate ter opišemo meritve, ki bi bile zanimive za nadaljnje delo.

## Poglavje 2

# Silicijevi fotodetektorji

### 2.1 Interakcije fotonov s snovjo

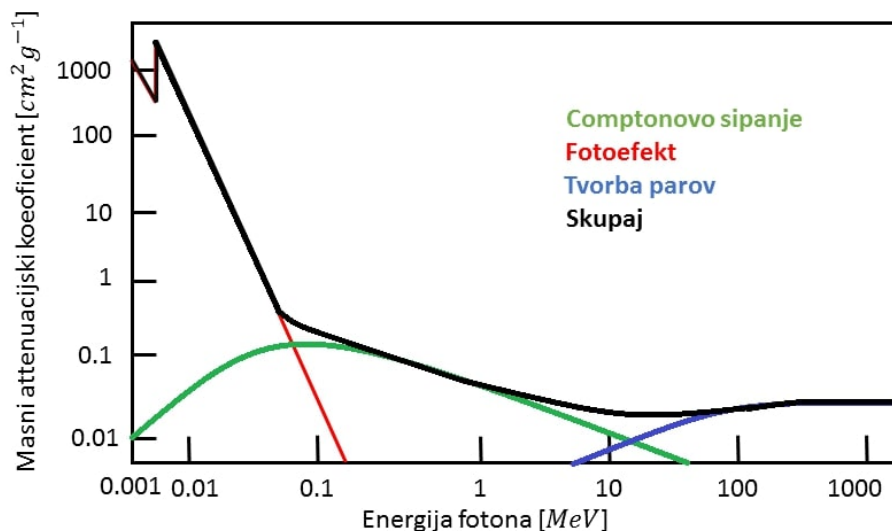
Da lahko fotodetektorji detektirajo fotone, morajo ti v detektorju interagirati. Trije glavni procesi preko katerih fotoni v snovi interagijo so fotoelektrični pojav, Comptonsko sipanje ter tvorba parov. Interakcija fotona v snovi je statističen proces. Verjetnost, preko katerega procesa bo foton v snovi interagiral, je odvisna od vrstnega števila snovi  $Z$  ter energije fotona  $E$  (Slika 2.1). Foton z valovno dolžino  $\lambda$  ima energijo enako:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (2.1)$$

kjer je  $\nu$  frekvenca svetlobe,  $c$  hitrost svetlobe ter  $h$  Planckova konstanta [3]. Verjetnost, da bo foton v snovi interagiral preko določenega procesa, podaja atenuacijski koeficient snovi  $\mu$ . Pogosto podajamo tudi masni atenuacijski koeficient, ki je definiran kot:

$$\mu_{masni} = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.2)$$

kjer je  $\rho$  gostota snovi.



Slika 2.1: Odvisnost masnega atenuacijskega koeficienta fotona v siliciju od energije. Slika je povzeta iz [4].

### 2.1.1 Fotoelektrični pojav

Pri nizkih energijah vpadnega fotona ter visokih vrstnih številih absorberja je prevladujoča interakcija fotoelektrični pojav. Pri tej interakciji foton preda vso svojo energijo elektronu. Da do fotoefekta lahko pride, mora imeti vpadni foton energijo višjo od vezavne energije elektrona. Vezavna energija elektrona v kristalu silicija je 1,12 eV, medtem ko je lahko v prostem atomu do 1839 eV za 1s orbitalo.

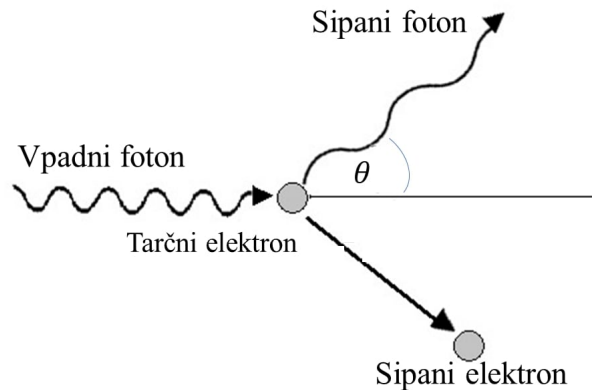
Verjetnost za fotoefekt je višja za močnejše vezane elektrone. V kolikor ima foton dovolj visoko energijo, bo izbiti fotoelektron tako prihajal iz bolj notranjih orbital. Glede na to kam odleti izbiti elektron, ločimo zunanji in notranji fotoefekt. V kolikor elektron zapusti snov, govorimo o zunanjem fotoefektu, v kolikor pa elektron ostane v snovi, govorimo o notranjem fotoefektu. Prav notranji fotoefekt je ta, ki omogoča detektiranje fotonov s pomočjo SiPM [3].

### 2.1.2 Comptonovo sipanje

Comptonovo sipanje je sipanje fotonov na prostih elektronih. V kolikor je vezavna energija elektrona veliko manjša od energije fotona, lahko elektron obravnavamo kot prost. Energija fotona po sipanju je enaka:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c_0^2} (1 - \cos(\theta))}, \quad (2.3)$$

kjer je  $\theta$  sipalni kot, pod katerim se foton giblje po sipanju, glede na vpadno smer (Slika 2.2). Iz enačbe 2.3 sledi, da foton preda maksimalno količino energije pri povratnem sipanju ( $\theta = 180^\circ$ ) [5].



Slika 2.2: Comptonovo sipanje. Slika je povzeta iz [5].

### 2.1.3 Tvorba parov

V primeru, ko je energija vpadnega fotona večja kot dvakratna mirovna energija elektrona ( $2m_e c_0^2 = 1,022 MeV$ ), lahko pride do tvorbe parov  $e^-e^+$ . Zaradi ohranitve gibalne količine lahko do te interakcije pride le v bližini nabitega masivnega telesa, s čigar coulombovim poljem foton interagira. Mejna vrednost energije fotona, ki je potrebna, da do tvorbe parov lahko pride, je enaka:

$$E_{mejna} = 2m_e c_0^2 + \left(1 + \frac{m_e}{M}\right), \quad (2.4)$$

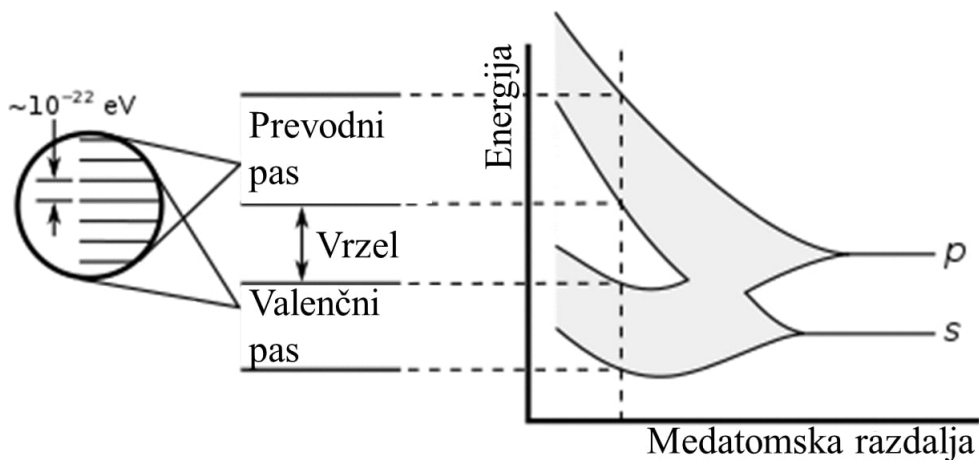
kjer je  $M$  masa nabitega masivnega telesa. Večja kot je masa nabitega telesa, manj energije potrebuje foton za tvorbo parov [3].

## 2.2 Polprevodniški fotodetektorji

### 2.2.1 Energijski nivoji v trdni snovi

Ko se razdalja med dvema atomoma zmanjša pod določeno mejo, se njuni energijski nivoji spremenijo. V kolikor imamo  $N$  atomov, ki se dovolj približajo, da se njihove elektronske orbitale prekrivajo, se vsak izmed prvotnih energijskih nivojev posameznega atoma, razveji na  $N$  različnih energijskih nivojev [6].

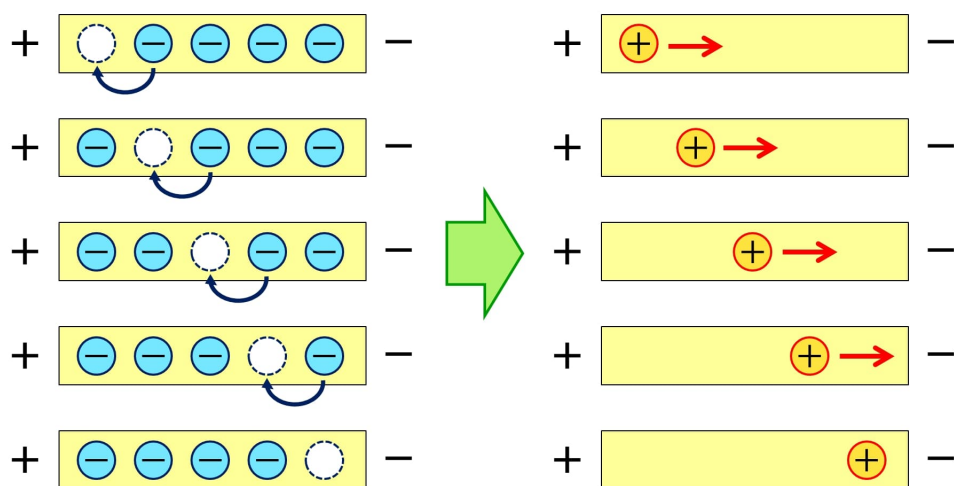
V trdni snovi, kjer je število atomov  $N$  večje od Avogadrovega števila ( $10^{23} cm^{-3}$ ), je tako tudi število energijskih nivojev zelo veliko. Energijska razlika med posameznimi nivoji je tako majhna, da jih lahko obravnavamo kot zvezne, kar imenujemo energijski pas. Najvišja energijska pasova sta najpomembnejša za razumevanje delovanja polprevodnika. Imenujeta se valenčni in prevodni pas (Slika 2.3). Pri temperaturi  $0 K$  je valenčni najvišji zaseden, prevodni pa prvi nezaseden energijski pas. Energijska razlika med njima je lahko od nekaj eV do nekaj 10 eV, lahko pa se celo prekrivata, v tem primeru je snov prevodnik [6].



Slika 2.3: Razvejitev energijskih pasov kot funkcija medatomske razdalje ter označena valenčni ter prevodni pas. Slika je povzeta iz [6].

### 2.2.2 Polprevodniki

Pri temperaturah večjih od  $0\text{ K}$  imajo lahko elektroni dovolj termične energije, da preidejo iz valenčnega v prevodni pas. V valenčnem pasu je tako ostala vrzel. V prisotnosti električnega polja se elektroni v valenčnem pasu premaknejo v nasprotni smeri polja. Tako se vrzel premika v smeri polja, kar rezultira v električnem toku zaradi navideznega gibanja pozitivnega naboja (Slika 2.4) [7].

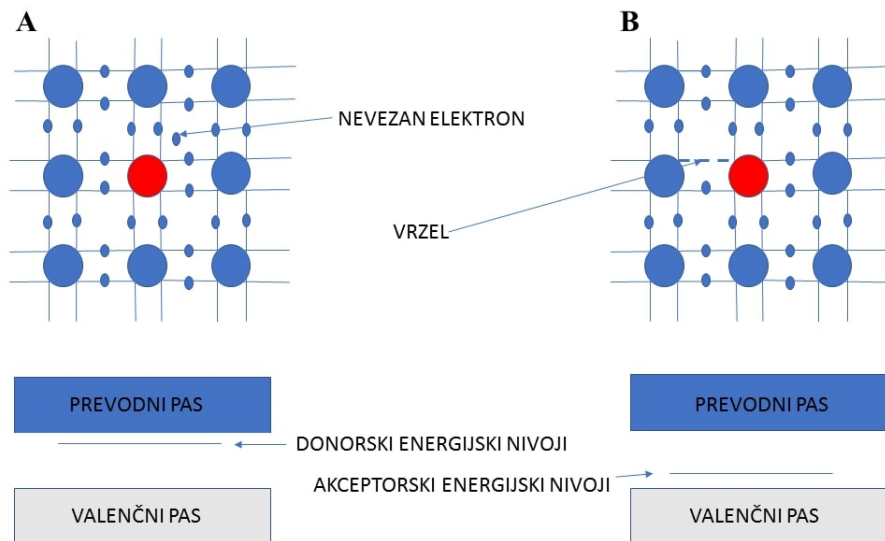


Slika 2.4: Prevajanje polprevodnika zaradi gibanja vrzeli. Slika je povzeta iz [7].



Prevajanje polprevodnikov lahko povečamo z dodajanjem nečistoč materialu. Ta proces, imenovan dopiranje, lahko izvedemo na več načinov. Pri enem izmed načinov ionizirane atome nečistoč ustrelimo v polprevodnik. Drugi način dopiranja pa je dodajanje atomov nečistoč med segrevanjem čistega polprevodnika, pri čemer se nečistoče z difuzijo porazdelijo po materialu [1].

Običajno dodajamo atome nečistoč, ki imajo en valenčni elektron manj ali več kot atom čistega polprevodnika. V primeru, ko dodamo atom z enim valenčnim elektronom manj, se bodo njegovi elektroni s kovalentno vezjo povezali z valenčnimi elektroni atoma polprevodnika, na mestu manjkajočega elektrona pa dobimo vrzel. Te vrzeli lahko zapolnijo drugi elektroni, to rezultira v gibanju vrzeli, kar je ekvivalentno gibanju pozitivnega naboja. Dodajanje nečistoč z manjkajočim valenčnim elektronom rezultira v novih energijskih nivojih, ki ležijo tik nad valenčnim pasom. Ker lahko te nivoje z lahkoto zasedejo elektroni z valenčnega pasa, jih imenujemo akceptorski nivoji. Tak polprevodnik imenujemo p-tip polprevodnika (Slika 2.5) [1]. V primeru, ko polprevodniku dodamo atome nečistoč z enim valenčnim elektronom več, bodo vsi valenčni elektroni razen enega tvorili kovalentne vezi z valenčnimi elektroni atoma polprevodnika. Novonastali energijski nivoji, zaradi dodajanja nečistoč z enim valenčnim elektronom več, ležijo tik pod prevodnim pasom. Elektroni iz teh energijskih nivojev lahko z lahkoto preidejo v prevodni pas, ker pri tem za njimi ne ostane vrzel, jih imenujemo donorski nivoji. Tak polprevodnik imenujemo n-tip polprevodnika (Slika 2.5) [1].



Slika 2.5: (A) n-tip in (B) p-tip polprevodnika ter označeni novonastali energijski nivoji zaradi dodanih atomov nečistoč.

V mnogih tehničnih aplikacijah združimo p in n tip polprevodnika, pri čemer nastane prevodna plast imenovana p-n stik [8].

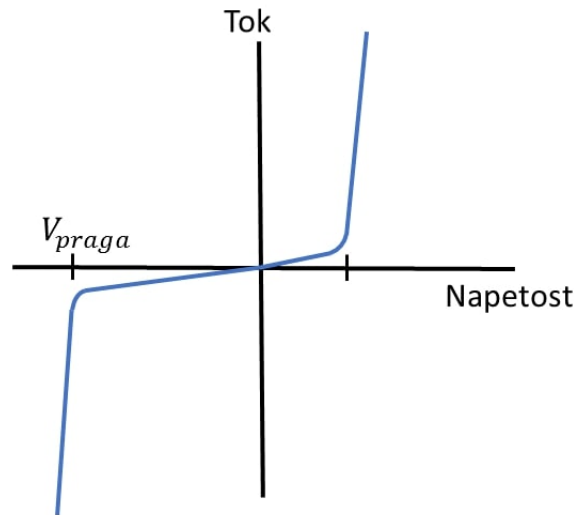
Ko združimo p in n tip polprevodnika, začnejo elektroni iz n-tipa z difuzijo prehajati v p-tip polprevodnika, vrzeli iz p-tipa pa v n-tip polprevodnika. Na področju ob stiku pride do rekombinacije elektronov ter vrzeli, kar rezultira v področju brez prostih nosilcev naboja. Takšno območje imenujemo osiromašeno območje. Difuzijo ustavi električno polje, ki nastane, ker postaja n-tip pozitivno nabit saj ga zapuščajo elektroni, p-tip pa negativno nabit, saj potujejo vrzeli proti n delu. Med p in

## Poglavje 2. Silicijevi fotodetektorji

---

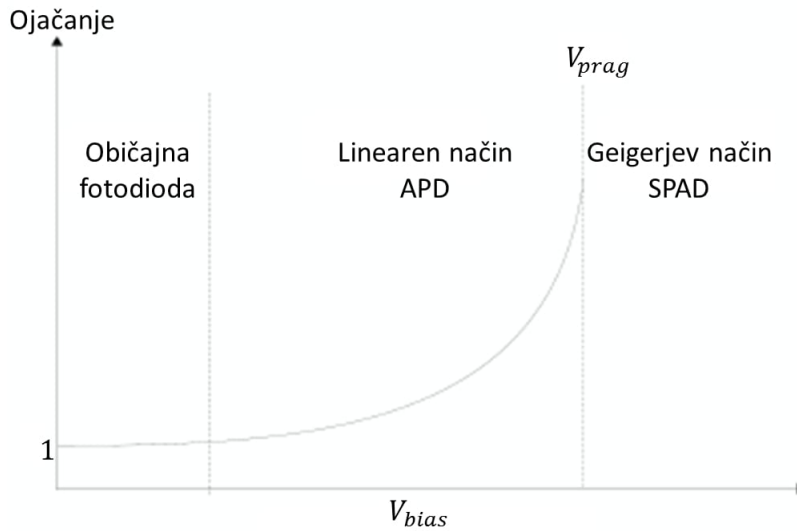
n delom se tako pojavi električna napetost [8].

Električno napetost lahko na tak polprevodnik dovedemo na dva načina. Lahko negativni pol priključimo na n del ter pozitivni pol na p del, v tem primeru smo napetost dovedli v prevodni smeri. V drugem primeru pa lahko negativni pol priključimo na p del ter pozitivni pol na n del polprevodnika. V tem primeru pa smo napetost dovedli v zaporni smeri. Tudi polprevodnik, kjer napetost dovedemo v zaporni smeri, bo na neki točki, ko bo dovedena napetost dovolj visoka, začel prevajati. Napetost, pri kateri se to zgodi, se imenuje napetost praga (*ang. Breakdown voltage* -  $V_{praga}$ ). Pri tej točki postane električno polje dovolj močno, da lahko pretrga vezi valenčnih elektronov atomov polprevodnika in jih pospeši preko izpraznjene plasti. Če napetost v zaporni smeri še povečujemo, lahko ti elektroni s trki povzročijo dodatne ionizacije ter tako sprožijo ionizacijski plaz. Nad napetostjo praga se tako električni tok z dodatnim povečevanjem napetosti v zaporni smeri močno povečuje (Slika 2.6) [8].



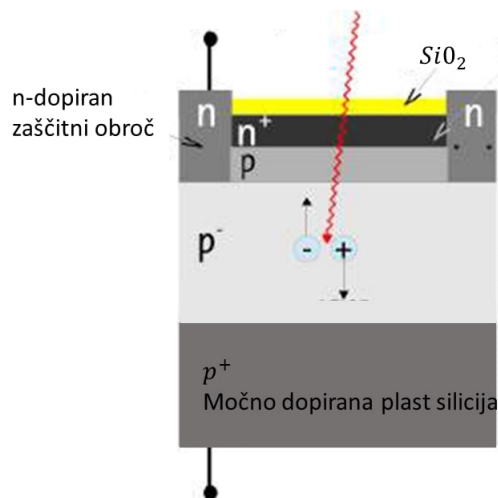
Slika 2.6: IV krivulja diode z označeno napetostjo praga. Slika je povzeta iz [8].

Plaz, ki nastane, ko napetost v zaporni smeri povečamo nad  $V_{praga}$ , izkoriščajo za svoje delovanje plazovne fotodiode APD. Fotoni interagirajo v polprevodniku in preko fotoefekta ustvarijo pare elektron-vrzel. Ker je napetost dovolj visoka, električno polje pospeši elektrone dovolj močno, da lahko ti s trki ustvarijo nove pare elektron-vrzel. Tako nastane plaz nosilcev naboja, ki ga lahko zaznamo na elektrodah, priključenih na detektor. APD je tako detektor, ki lahko zazna tudi zelo šibke intenzitete svetlobe, SPAD pa celo posamezne fotone. Medtem, ko je odziv APD linearno odvisen od števila vpadlih fotonov ter njihovo ojačanje reda  $10^2$ , je odziv SPAD močno nelinearen, njihovo ojačanje pa sega vse do  $10^3$  (Slika 2.7). Iz odziva SPAD tako ne moremo določiti koliko fotonov je vpadlo na detektor. Struktura APD ter SPAD je tehnično enaka, glavna razlika je v tem, da APD delujejo pri napetostih, ki so blizu, ampak malo nižje od napetosti praga, medtem, ko SPAD delujejo pri napetostih, ki so okoli 10 % do 20 % višje od napetosti praga.



Slika 2.7: Ojačanje APD ter SPAD. Slika je povzeta iz [1].

Osnova zgradbe APD oz. SPAD je močno dopirana plast silicija. Na vrhu detektorskega elementa je plast  $SiO_2$ , ki služi, kot ščit p-n stika pred zunanjimi vplivi. Okoli te plasti je nameščen zaščitni obroč (*ang. Guard ring*, ki je n-dopiran ter služi za stabilnost električnega polja v detektorju. Na močno dopirano plast silicija sta nanešeni tanki plasti  $p^+$  ter  $n^+$ , med katerima se ustvari osiromašeno področje, debelo okoli  $1\mu m$ . Shema zgradbe APD oz. SPAD je prikazana na sliki 2.8 [1].



Slika 2.8: Zgradba APD oz. SPAD detektorja. Slika je povzeta iz [1].

## 2.3 Silicijeve fotopomnoževalke

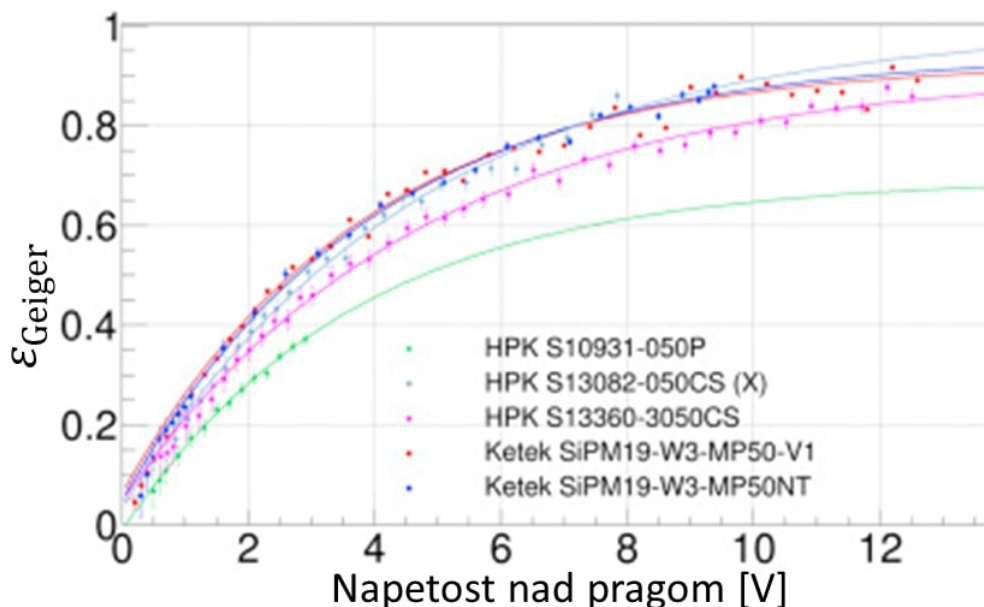
Silicijeve fotopomnoževalke so polprevodniški detektorji, ki združujejo linearen odziv kot prednost APD ter zmožnost detekcije posameznih fotonov kot prednost SPAD detektorjev. Vse dokler je število vpadnih fotonov veliko manjše od števila celic, je signal, ki ga dobimo na izhodu, sorazmeren številu vpadnih fotonov. SiPM je sestavljen iz nekaj sto do nekaj tisoč vzporedno povezanih SPAD detektorjev. Vsaka posamezna plazovna fotodioda ima stranico veliko nekaj  $10 \mu\text{m}$ , celotna površina silicijeve fotopomnoževalke pa meri nekaj  $\text{mm}^2$ . Vsaka plazovna dioda ima vezan upornik, ki poskrbi za zadušitev plaza po tem, ko smo signal zaznali [1].

### Učinkovitost zaznavanja fotonov

Učinkovitost zaznavanja fotonov (*ang. Photon detection efficiency* - PDE) podaja občutljivost SiPM. Odvisna je od valovne dolžine vpadnih fotonov, napetosti, pri kateri uporabljamo detektor ter zapolnitvenega razmerja  $F$  (*ang. Fill factor*). PDE podaja verjetnost, da vpadli foton interagira v celici ter sproži Geigerjevo razelektritev. Definiran je kot:

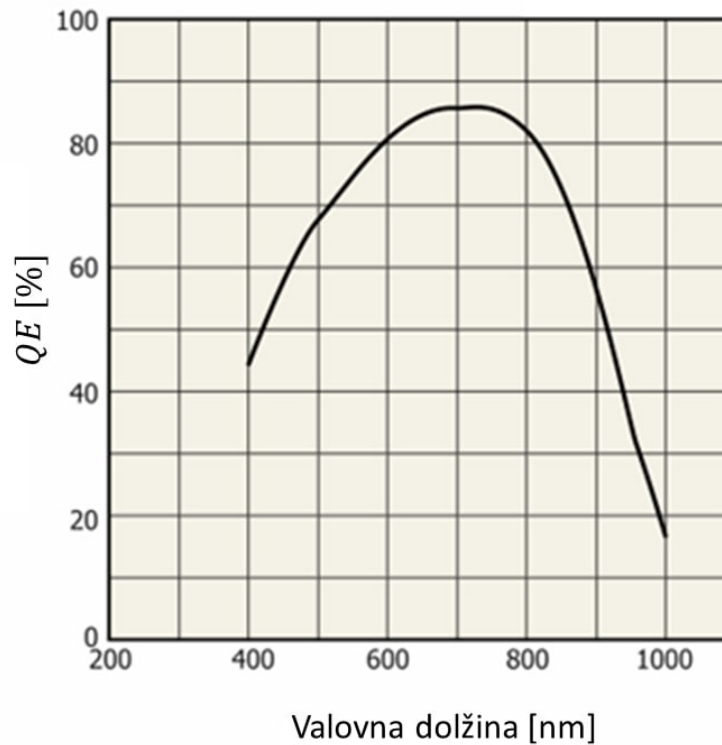
$$PDE = QE \cdot F \cdot \epsilon_{Geiger}, \quad (2.5)$$

pri čemer je  $QE$  kvantni izkoristek,  $\epsilon_{Geiger}$  pa verjetnost, da nastali elektron v paru elektron vrzel, ki nastane zaradi interakcije vpadlega fotona, sproži Geigerjevo razelektritev [9].



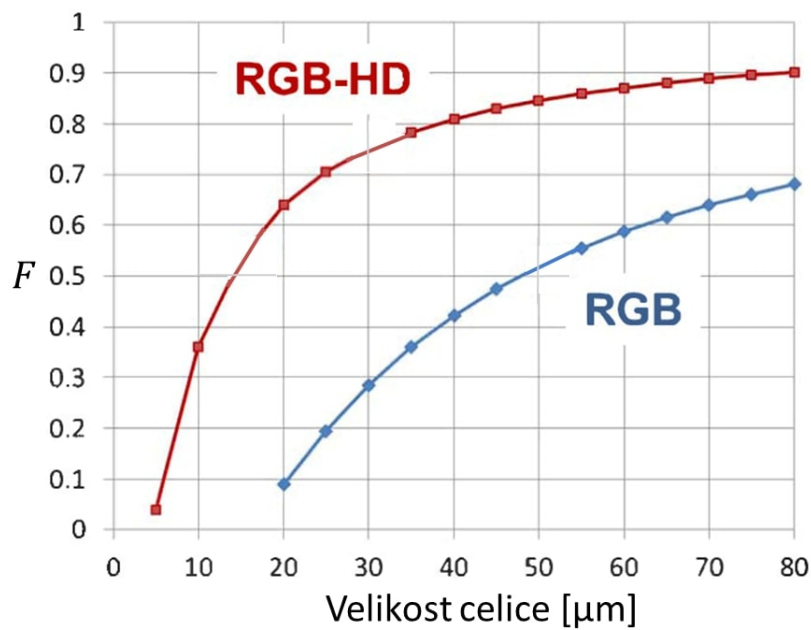
Slika 2.9: Odvisnost  $\epsilon_{Geiger}$  od napetosti nad pragom za SiPM S10931-050P, S13082-050CS (X), S13360-3050CS proizvajalca Hamamatsu ter SiPM19-W3-MP50-V1 in SiPM19-W3-MP50NT proizvajalca Ketek. Slika je povzeta iz [10].

Kvantni izkoristek je verjetnost, da vpadni foton povzroči nastanek para elektron vrzel in je funkcija valovne dolžine.  $QE$  doseže vrednosti do 90% (Slika 2.10) [9].

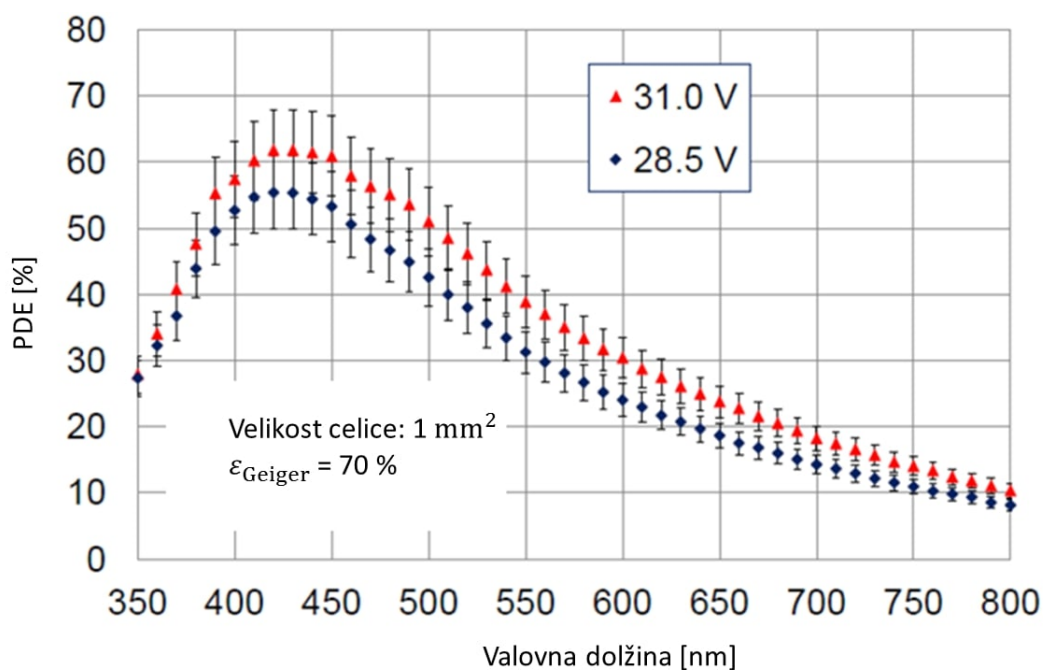


Slika 2.10: Kvantni izkoristek SiPM za primer SiPM proizvajalca Hamamatsu. Slika je povzeta iz [9].

Zapolnitveno razmerje je enako razmerju med aktivno ter celotno površino detektorskega elementa. Elektronika sistema zavzame določeno površino, zato je zapolnitveno razmerje vedno manjše od 1. Večja, kot je velikost silicijeve fotopomnoževalke, večje je zapolnitveno razmerje, saj ob nespremenjeni velikosti elektronskih komponent aktivna površina zaseda večje področje. Tipična odvisnost zapolnitvenega razmerja v odvisnosti od velikosti SiPM je prikazana na sliki 2.11.  $\epsilon_{geiger}$  je odvisen od napetosti, pri kateri uporabljamo detektor ter od položaja v detektorju, pri kateri foton interagira ter sproži nastanek para elektron-vrzel. PDE dosega vrednosti do 70% (Slika 2.12) [12].



Slika 2.11: Zapolnitveno razmerje v odvisnosti od velikosti SiPM. Obe SiPM sta detektorja proizvajalca FBK. SiPM RGB-HD je detektor razvit s ciljem dosegati visoko zapolnitveno razmerje. Slika je povzeta iz [11].



Slika 2.12: Učinkovitost zaznavanja fotonov za primer SiPM proizvajalca KETEK. Slika je povzeta iz [12].

## Napetost praga

SiPM delujejo pri napetostih nad napetostjo praga. Napetost pri kateri SiPM uporabljamo, podajamo kot vrednost napetosti nad napetostjo praga ( *ang. Overvoltage:  $V_{overvoltage}$* ). Mnogo lastnosti SiPM je funkcija  $V_{overvoltage}$ . Napetost praga je odvisna od dopiranja polprevodnika ter od temperature ( $T$ ). Dopiranje vpliva na moč električnega polja v polprevodniku ter na debelino osiromašene plasti. Napetost praga lahko ocenimo kot:

$$V_{praga} = \frac{\varepsilon \cdot E_{max}^2}{2e_0 \cdot N_{eff}}, \quad (2.6)$$

kjer je  $\varepsilon$  dielektrična konstanta polprevodnika,  $E_{max}$  maksimalna velikost električnega polja na p-n stiku ter  $N_{eff}$  koncentracija nečistoč na strani, kjer je koncentracija nečistoč manjša [1].

Z višanjem temperature se vibracijska energija atomov v mreži polprevodnika povečuje zaradi česar bodo nosilci naboja izgubili več energije zaradi sipanja na kristalni mreži. Zaradi tega je povprečna prosta pot nosilcev naboja manjša ter je potrebno močnejše električno polje, ki pospeši nosilce naboja dovolj, da lahko ti s trki ustvarjajo nove pare elektron-vrzel. Povprečno prosto pot lahko določimo kot:

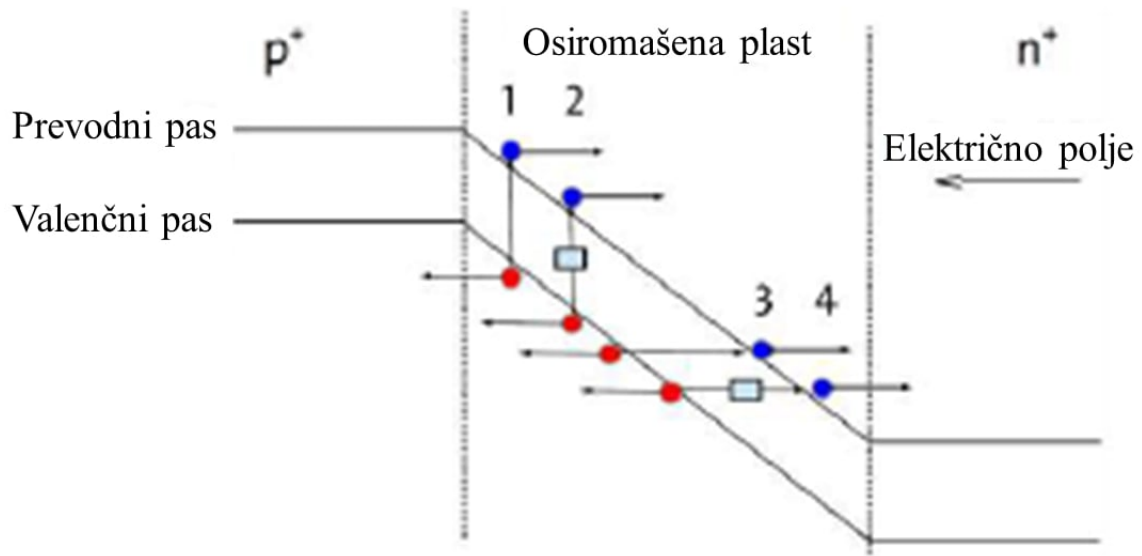
$$L = L(T_0) \cdot \tanh\left(\frac{E_p(T_0)}{2k_B \cdot T}\right), \quad (2.7)$$

kjer je  $E_p(T_0)$  energija fononov, ki nastanejo pri sipanju nosilcev naboja na kristalni ravnini,  $T_0$  je 0 K ter  $k_B$  Boltzmanova konstanta [1].

## Temni šum

Geigerjevo razelektritev lahko ob vpadnih fotonih sprožijo tudi termične eksitacije ter tuneliranje. Ker lahko do teh pojavov pride tudi brez prisotnosti svetlobe, imenujemo takšne razelektritve temni šum. Na sliki 2.13 sta prikazana procesa, ki povzročata temni šum, in sicer tako direktni kot nedirektni (povzročen zaradi dodatnih energijskih nivojev) proces [1].

Tako v večjih kot manjših celicah iste serije, je gostota nečistoč načeloma enaka. Ker je število nečistoč v večji celici torej večje, je tudi temni šum zaradi tuneliranja, asistiranega s strani dodatnih energijskih nivojev zaradi nečistoč (3 na sliki 2.13), večji. Medtem ko je glavni prispevek k temnemu šumu pri sobni temperaturi termična eksitacija, je pri nižjih temperaturah ter velikih jakostih električnega polja, glavni doprinos k temnemu šumu tuneliranje [1].



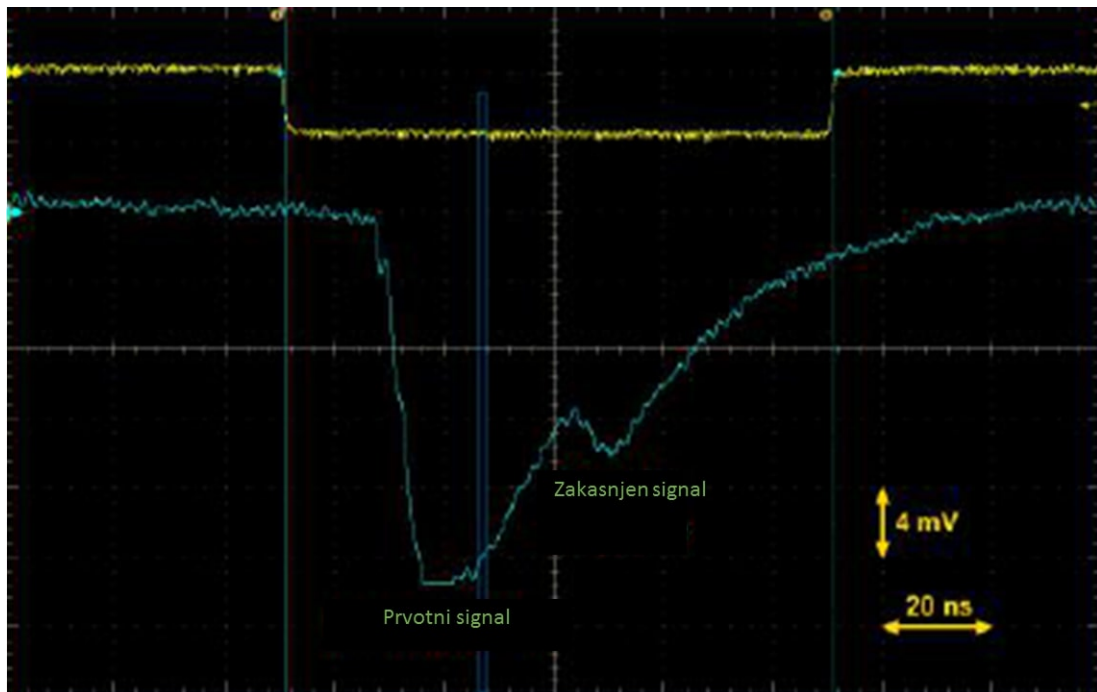
Slika 2.13: Procesi, ki povzročajo temni šum. 1: Direktna termična eksitacija. 2: Termična eksitacija asistirana s strani dodatnih energijskih nivojev zaradi nečistoč. 3: Tuneliranje. 4: Tuneliranje asistirano s strani dodatnih energijskih nivojev zaradi nečistoč. Slika je povzeta iz [1].



## Zakasnjjen signal

Na poškodbah v celici, še posebej te na sredi osiromašene plasti, se lahko nosilci naboja ujamejo in ostanejo ujeti. Po karakterističnem času  $\tau_s$ , se ti ujeti nosilci naboja sprostijo ter lahko sprožijo nov plaz razelektritve. Ker se to zgodi, preden z upornikom zadušimo prvotni signal ter je celica pripravljena na nov foton, je zakasnjjen signal manjši kot prvotni (Slika 2.14).

Na število zakasnenih signalov močno vplivata napetost ter temperatura. Pri višji napetosti je število prostih nosilcev naboja večje in posledično se lahko pogosteje ujamejo na defektih v celici. Zaradi tega je priporočeno diode uporabljati pri čim manjši napetosti nad napetostjo praga. Temperatura vpliva na sproščanje nosilcev naboja z defektov v celici, in sicer pri nižji temperaturi ostanejo nosilci naboja ujeti dalj časa, zato je verjetnost, da bodo sprožili zakasnjjen signal višja [1].



Slika 2.14: Zajem slike osciloskopa z vidnim prvotnim in zakasnjjenim signalom. Slika je povzeta iz [1].

## Optični presluh

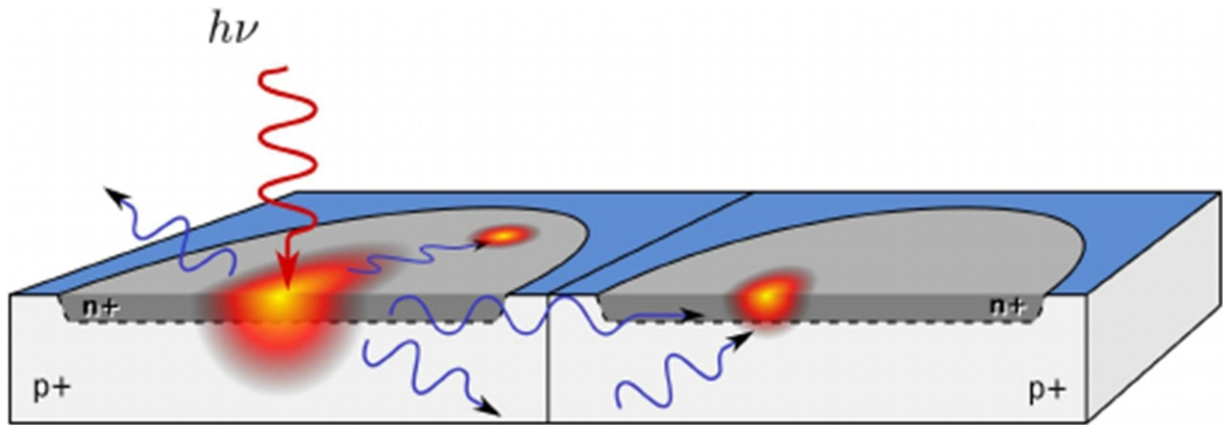
Pri vsaki Geigerjevi razelektritvi se izsevajo približno trije fotoni z energijo nad  $1,14 \text{ eV}$  na vsakih sto tisoč elektronov. Fotoni nastanejo pri zavornem sevanju nosilcev naboja ter pri rekombinaciji elektronov ter vrzeli. Ti fotoni lahko pripotujejo do sosednjih celic, kjer lahko sprožijo razelektritev. To se lahko zgodi tako, da foton potuje direktno do sosednje celice, ali pa se reflektira na površini SiPM ter zadene sosednjo celico. Za zmanjšanje optičnega presluha zaradi neposrednega prehoda

## Poglavje 2. Silicijevi fotodetektorji

---

fotonov iz ene v drugo celico v novejših izvedbah silicijevih fotopomnoževalk uporabimo pregrade med posameznimi celicami [1].

Optični presluh je verjetnejši pri večjem številu nosilcev naboja, torej ga lahko zmanjšamo z zmanjšanjem ojačenja. To storimo tako, da zmanjšamo zaporno napetost, s čimer pa zmanjšamo tudi verjetnost, da bomo zaznali željen dogodek [1].



Slika 2.15: Optični presluh zaradi direktnega ter nedirektnega prehoda fotona v sosednjo celico. Slika je povzeta iz [13].

## Poglavje 3

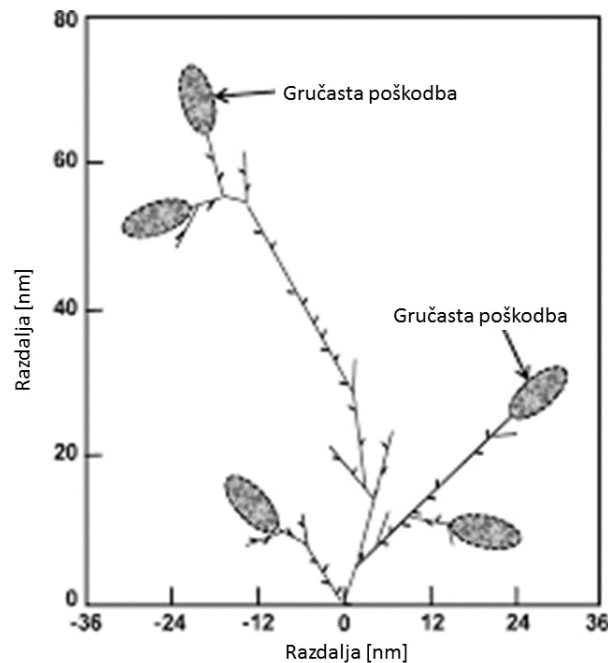
# Sevalne poškodbe polprevodniških detektorjev

Polprevodniške detektorje uporabljamo v številnih sevalnih okoljih, kot so na primer diagnostične naprave v medicini ali detektorji v eksperimentih fizike jedra in osnovnih delcev. Pri tem utrpijo sevalne poškodbe tako zaradi delcev kot elektromagnetnega valovanja. Poškodbe, ki jih polprevodniški detektor utрпи zaradi sevanja, so v splošnem dveh vrst, poškodbe zaradi ionizirajočih energijskih izgub (*Ionizing Energy Loss* (IEL)) ter poškodbe kristalne mreže zaradi neionizirajočih energijskih izgub (*Non Ionizing Energy Loss* (NIEL)).

Fotoni z energijo pod 300 keV, ki je mejna vrednost za nastanek poškodb kristalne mreže v kristalu silicija, povzročijo v glavnem poškodbe v  $SiO_2$  ter na mejni plasti  $Si - SiO_2$ . Na površinski plasti silicijevega oksida ( $SiO_2$ ) povzročijo sevalni delci nastanek parov elektron-vrzel. Del teh parov se rekombinira, del pa se giblje zaradi difuzije ter prisotnosti električnega polja. Večina elektronov zapusti plast  $SiO_2$ , vrzeli pa ostanejo ujete na dodatnih energijskih nivojih nastalih zaradi sevanja v  $SiO_2$  ali na meji  $Si - SiO_2$ . Ob prisotnosti električnega polja delujejo ti energijski nivoji kot generacijski centri za površinski tok [14].

Obsevanje polprevodniških detektorjev z nabitimi delci višjih energij ter z nevtroni, v glavnem povzroči nastanek poškodb kristalne mreže. Visokoenergijski delci, kot so protoni, pioni, elektroni, fotoni ter nevtroni lahko izbijejo atome iz njihovih mest v kristalni mreži ter tako ustvarijo poškodbe v kristalu. Tak atom, ki ga imenujemo tudi primarni izbiti atom (*ang. primary Knock-on Atom*: PKA), pusti za sabo vrzel ter se premakne med druge atome v kristalu. Če ima PKA dovolj visoko energijo ( $> 1 \text{ keV}$ ), lahko povzroči izbitje nadaljnjih atomov, kar povzroči nastanek gručastih poškodb kristalne mreže (Slika 3.1) [14].

V tabeli 3.1 so zapisane tako vrednosti povprečne ( $T_{pov}$ ) ter maksimalne ( $T_{max}$ ) prenešene energije pri interakciji različnih 1 MeV delcev v kristalu silicija, kot minimalna potrebna energija za tvorbo točkovnih ( $E_{toc}$ ) in gručastih poškodb ( $E_{gruc}$ ).

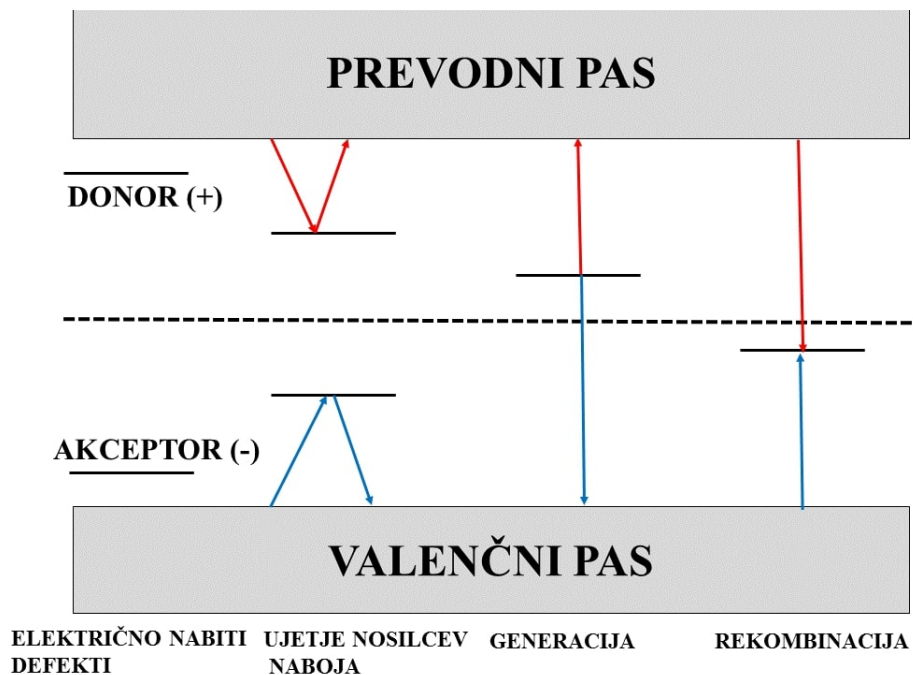


Slika 3.1: Simulacija nastanka poškodb zaradi PKA. Slika je povzeta iz [15].

Sevalne poškodbe povzročijo nastanek novih energijskih nivojev med valenčnim in prevodnim pasom, kar rezultira v spremembah v delovanju detektorja. Na sliki 3.2 so označeni novonastali energijski nivoji zaradi sevalnih poškodb. Energijski nivoji, ki ležijo na sredi energijske vrzeli, prispevajo h generaciji ali rekombinaciji parov elektron-vrzel. Bližje sredi energijske vrzeli, kot so energijski nivoji zaradi sevalnih poškodb, večja je verjetnost za generacijo ali rekombinacijo. Posledica sevalnih poškodb, ki vodijo do generacije in rekombinacije, je spremenjena gostota prostih nosilcev naboja ter povečan temni šum [14].

Sevanje lahko povzroči nastanek električno nabitih defektov, ki so lahko akceptorji ali donorji elektronov. Takšne poškodbe vplivajo na koncentracijo nečistoč ter s tem na debelino osiromašene plasti. Posledično se spremeni pragovna napetost detektorja. Če energijski nivoji zaradi nabitih defektov ležijo bližje sredi energijske vrzeli, povečajo generacijo prostih nosilcev naboja ter s tem temni šum [14].

Tretja možnost pa je nastanek sevalnih poškodb, ki delujejo kot centri, na katerih se elektroni ali vrzeli ujamejo ter se sprostijo šele po določenem času. To lahko vpliva na zakasnen signal ter na optični presluh, vendar je ta vpliv minimalen, saj povečan temni šum zaradi sevalnih poškodb onemogoča vidnost teh učinkov.



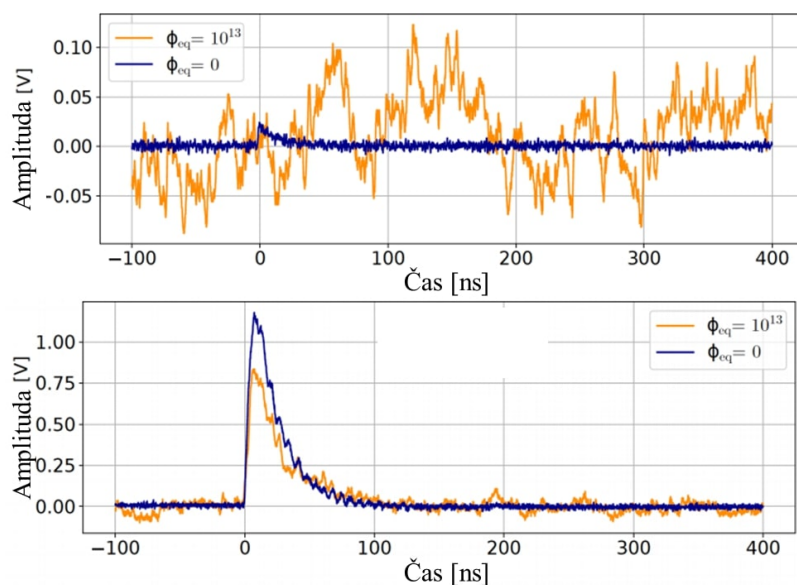
Slika 3.2: Sevalne poškodbe v energijski vrzeli polprevodnika ter njihovi makroskopski efekti. Slika je povzeta po [16].

Delec	e	p	n	Si+
Interakcija	EM	EM + močna	močna	em
$T_{pov}$ [keV]	0.046	0.210	50	0.265
$T_{max}$ [keV]	0.155	133.7	133.9	1000
$E_{toc}$ [keV]	260	0.190	0.190	0.025
$E_{gruc}$ [keV]	4600	15	15	2

Tabela 3.1: Povprečna ter maksimalna prenesena energija pri interakciji 1 MeV elektrona, protona, nevtrona ter silicijevega atoma, ter minimalna potrebna energija za tvorbo točkovnih poškodb ter poškodb kristalne mreže v kristalu silicija. Tabela je povzeta po [17].

### 3.1 Sevalne poškodbe SiPM

Zaradi povečanega temnega šuma izgubijo silicijeve fotopomnoževalke sposobnost detekcije posameznega fotona. Fluenca je skupno število delcev, ki zadenejo površino v času obsevanja. Fluenca, pri kateri SiPM izgubi sposobnost detekcije enega fotona, je odvisna od temperature, vrste sevanja ter same zgradbe detektorja. Na sliki 3.3 je označen signal, ki ga dobimo pri vpadu enega fotona (zgornja slika) ter pri vpadu  $\approx 100$  fotonov (spodnja slika). Z modro je označen signal, ki ga dobimo pred obsevanjem, z oranžno pa po obsevanju z nevtroni s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .  $\Phi_{eq}$  je fluenca 1 MeV nevtronov, ki bi povzročila enako škodo v detektorju kot delci, s katerimi obsevamo detektor [14].



Slika 3.3: Signal, ki ga dobimo pri vpadu enega fotona (zgornja slika) ter pri vpadu  $\approx 100$  fotonov (spodnja slika) pri temperaturi  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  ter  $2,5 \text{ V}$  napetosti nad pragom. Z modro je označen signal, ki ga dobimo pred obsevanjem, z oranžno pa po obsevanju z nevtroni s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . Slika je povzeta po [14].

#### Poškodbe v $\text{SiO}_2$ ter na mejni plasti $\text{Si} - \text{SiO}_2$ v SiPM zaradi obsevanja z X-žarki

Pri obsevanju z X-žarki energija fotonov običajno ne presega  $100 \text{ keV}$ . Ker je mejna vrednost za poškodbe kristalne mreže  $300 \text{ keV}$ , obsevanje z X žarki povzroči nastanek defektov v  $\text{SiO}_2$  ter na mejni plasti  $\text{Si} - \text{SiO}_2$ .

Kapacitivnost in upor SiPM ter s tem tudi karakteristični čas zadržitve signala se po obsevanju ne spremenijo. Pri obsevanju z dozami nad  $20 \text{ MGy}$  se za tri rede velikosti poveča temni šum, vsota vsega temnega šuma, ki jo imenujemo temni tok, pa pri tem naraste le za red velikosti, kar kaže na to, da velik del nosilcev naboja, ki prispevajo k temnemu šumu, ne povzroči nastankov novih parov elektron vrzel. Pri načrtovanju sevalno odpornih SiPM je tako potrebno posebno pozornost nameniti načrtovanju površinskih struktur, ki zagotavljajo, da čim manj parov elektron vrzel

nastalih na površinski plasti zaradi sevalnih poškodb, doseže osiromašeno plast, kjer se lahko pomnožijo ter sprožijo Geigerjevo razelektritev [14].

### Poškodbe kristalne mreže SiPM zaradi obsevanja z elektroni ter $\gamma$ žarki

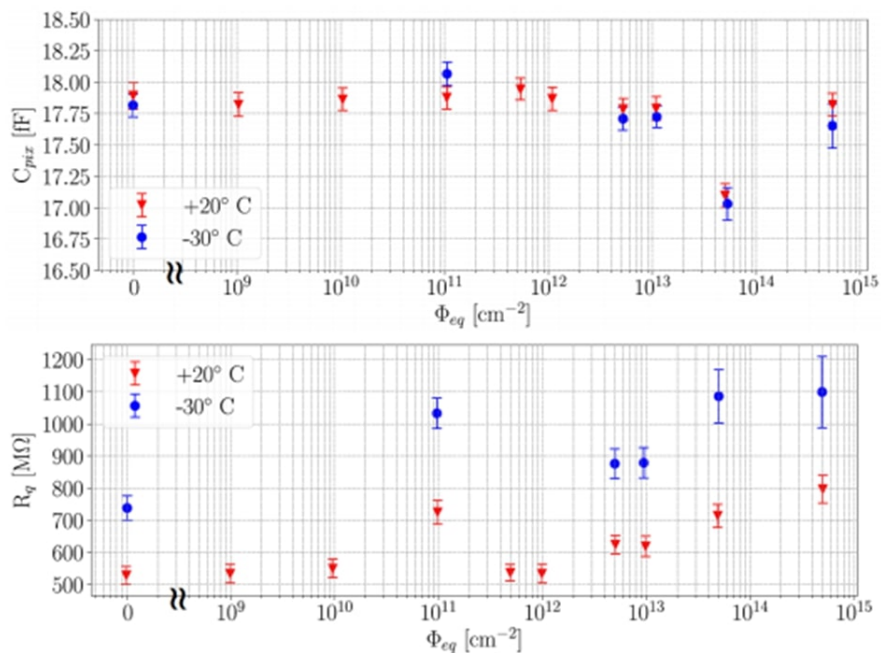
Raziskovalna skupina pod vodstvom Matsubare je izpostavila silicijeve fotopomnoževalke proizvajalca Hamamatsu žarkom  $\gamma$  radioaktivnega elementa  $^{60}\text{Co}$ . Doza izpostavljenosti je dosegla 240 Gy. Medtem ko se pomnoževalni faktor ter optični presluh po obsevanju nista spremenila, se je temni šum povečal [18]. Raziskovalna skupina pod vodstvom S. Lombardo je raziskavo dopolnila še pri višjih dozah, in sicer je izmerila karakteristike SiPM proizvajalca ST Microelectronics po obsevanju z  $^{60}\text{Co}$ , do skupne doze 0 Gy, 10 Gy, 136 Gy, 1.3 kGy ter 9,4 kGy. Detektor je ohranil sposobnost zaznave posameznega fotona do doze 136 Gy. Do te doze se praktično ne spremenijo tudi vrednosti pomnoževalnega faktorja, optičnega presluha ter temnega šuma in toka. Medtem, ko pomnoževalnega faktorja nad 1 kGy ni bilo mogoče določiti, narasteta optični presluh ter temni tok za 15-krat ter temni šum za približno 7-krat [19].

### Poškodbe kristalne mreže SiPM zaradi obsevanja s hadroni

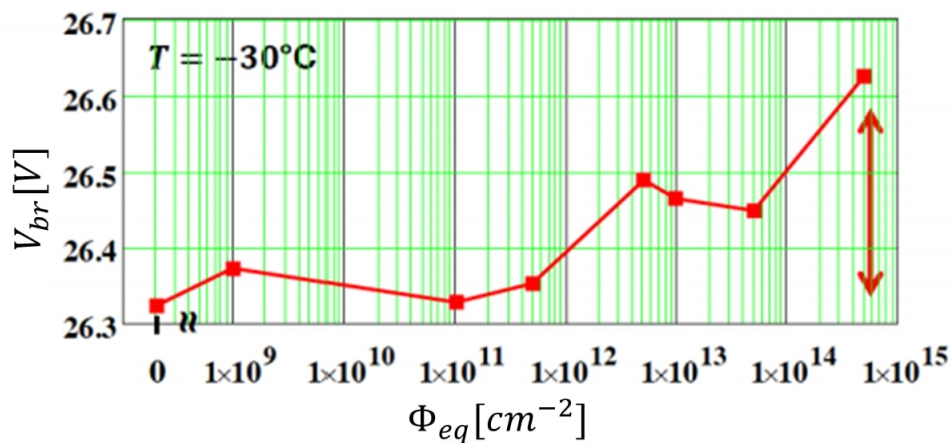
Številne raziskovalne skupine so obsevale SiPM z nevtroni ter protoni. Medtem ko za srednje fluence do  $\Phi_{eq} < 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  ni sprememb v vrednostih pragovne napetosti, pomnoževalnega faktorja, kapacitivnosti ter upornosti SiPM, pa temni šum ter temni tok naraščata linearno s fluenco. Za visoke fluence nad  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  pa se ob povečanju temnega šuma ter temnega toka spremenijo tudi vrednosti pragovne napetosti, pomnoževalnega faktorja ter upornosti.

M. C. Vignali in drugi so raziskovali vpliv obsevanja SiPM z nevtroni. Medtem ko se kapacitivnost ne spreminja s fluenco ter temperaturo, narašča upornost detektorja tako s fluenco kot seveda s temperaturo (Slika 3.4) [20].

S. Cerioli in sodelavci so z nevtroni obsevali silicijeve fotopomnoževalke proizvajalca KETEK. Obsevali so s fluencami vse do  $\Phi_{eq} = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . Do fluence  $\Phi_{eq} = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  je bila vrednost pragovne napetosti konstantna, nad  $\Phi_{eq} = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  pa je narastla za približno 300 mV glede na vrednost pred obsevanjem (Slika 3.5) [21].



Slika 3.4: Kapacitivnost (zgornja slika) ter upornost (spodnja slika) pri različnih fluencah nevtronov, pri temperaturi  $-30^\circ\text{C}$  ter  $20^\circ\text{C}$  [20].



Slika 3.5: Vrednost pragovne napetosti KETEK po obsevanju z različnimi fluencami nevtronov. Slika je povzeta po [21].



## 3.2 Izboljšanje sevalne odpornosti polprevodnikov

Ker se uporabi polprevodniških detektorjev v sevalnih okoljih ne moremo in tudi ne želimo izogniti, se poslužujemo različnih metod s katerimi izboljšamo njihovo sevalno odpornost. Med drugim lahko:

- Uporabljamo močno dopirane detektorje, saj je v tem primeru relativna sprememba koncentracije nečistoč zaradi sevalnih poškodb manjša.
- Uporabljamo SiPM z manjšo velikostjo celic. Manjše celice imajo manjšo kapacitivnost, s tem pa je krajši tudi karakteristični čas potreben, da z upornikom zadušimo signal ter detektor pripravimo na nov dogodek. Temni šum, ki je zaradi sevalnih poškodb bolj pogost, tako onesposobi detektor za krajši čas.
- Silicijeve detektorje pogosto obogatimo s kisikom. Z obsevanjem takšnih detektorjev pride do interakcij med nastalimi akceptorskimi ter donorskimi defekti, ki se med seboj izničijo. Prav tako namesto globljih energijskih nivojev nastanejo takšni, ki so bližje valenčnemu ali prevodnemu pasu. Verjetnost, da takšni energijski nivoji povzročijo temni šum pa je manjša.
- Temperaturo detektorja lahko znižamo, s čimer zmanjšamo termično energijo prostih elektronov ter vrzeli in s tem tudi temni šum.
- Uporaba detektorjev s tanjšo osiromašeno plastjo. Sprememba pragovne napetosti po obsevanju je namreč manjša za detektorje z manjšo debelino osiromašene plasti. V tanjši osiromašeni plasti nastane namreč manj sevalnih poškodb, zaradi česar je sevalna občutljivost takšnega detektorja manjša. Tanjšo osiromašeno plast lahko dosežemo z uporabo močno dopiranih polprevodnikov.

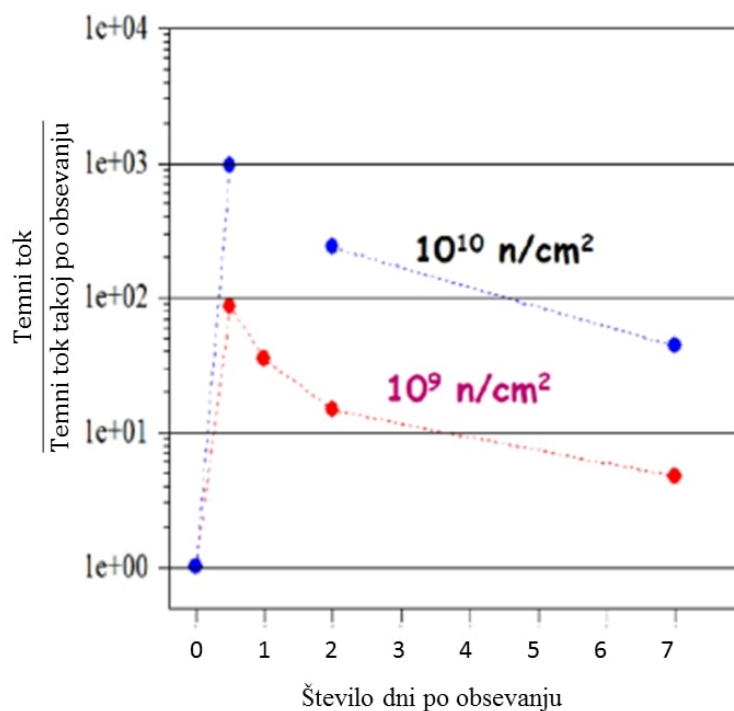
## 3.3 Okrevanje polprevodniških detektorjev pri povišani temperaturi

Z višanjem temperature povečamo mobilnost nastalih sevalnih poškodb. Že pri sobni temperaturi je ta mobilnost dovolj visoka, da lahko pride do rekombinacije ter s tem odprave nekaterih defektov, kar bomo poskušali v naši raziskavi dokazati z merjenjem karakteristik SiPM pred in po obsevanju ter po okrevanju obsevanih detektorjev pri povišani temperaturi. S segrevanjem detektorjev do višjih temperatur ta efekt še pospešimo. Proces imenujemo okrevanje detektorjev pri povišani temperaturi (*ang. Thermal annealing*) [1].

Za odpravo različnih sevalnih poškodb so potrebne različne temperature. Medtem ko so najpreprostejše, kot so npr. posamezne vrzeli ter točkovne poškodbe odpravljene že pri sobni temperaturi, so za odpravo kompleksnejših poškodb potrebne veliko višje temperature tudi vse tja do 300 °C. Vendar lahko segrevanje pri tako visokih temperaturah povzroči, da iz sevalnih defektov nastanejo kompleksnejše poškodbe, ki imajo višjo temperaturno obstojnost obenem pa lahko temperatura višja od 250 °C mehansko poškoduje SiPM [1, 22].

Okrevanje SiPM pri povišani temperaturi so proučevale že nekatere raziskovalne skupine. Skupina pod vodstvom I. Nakamure je obsevala SiPM z nevtroni s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Ugotovili so, da SiPM takoj po obsevanju izgubi sposobnost detekcije posameznega fotona. Po dveh mesecih termičnega okrevanja pri sobni temperaturi, se bili detektorji ponovno sposobni detektirati posamezne fotone [23].

Želimo si, da bi lahko SiPM detektorje, ki jih uporabljamo v sevalnih okoljih, segrevali z električnim tokom, ter tako odpravili sevalne poškodbe, ki jih detektor utrpi. Tako bi lahko namreč sevalne poškodbe odpravljali kar na mestu uporabe detektorjev. T. Tsang je s svojo raziskovalno skupino obseval SiPM detektorje z nevtroni s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Po obsevanju so jih s pomočjo 10 mA električnega toka v prevodni smeri segreli do temperature  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ . Po segrevanju so bili detektorji ponovno sposobni detektirati posamezen foton pri temperaturi  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Velikost temnega toka pa je tudi po nekaj dneh okrevanja pri povišani temperaturi bila višja kot pred obsevanjem (Slika 3.6) [24].



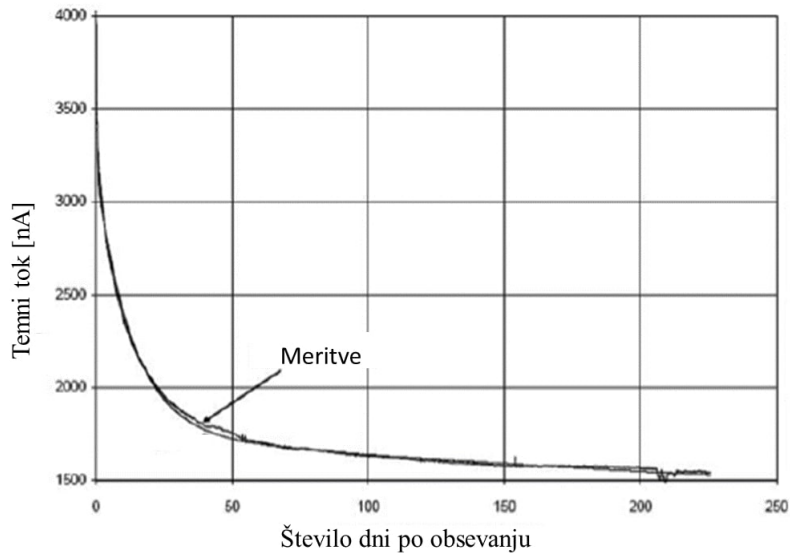
Slika 3.6: Odvisnost temnega toka od časa okrevanja SiPM proizvajalca FBK pri povišani temperaturi, obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^9 \text{ cm}^{-2}$  ter  $\Phi_{eq} = 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Slika je povzeta po [24].

Vpliv okrevanja pri povišani temperaturi na odpravo sevalnih poškodb drugih polprevodniških detektorjev so prav tako že raziskovale nekatere skupine. Raziskovalna skupina pod vodstvom Y. Musienka je proučevala detektorje APD proizvajalca Hamamatsu po obsevanju z nevtroni s fluencami do  $\Phi_{eq} = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . Merili so temni tok ter ojačanje v odvisnosti od  $V_{bias}$ , pri temperaturi  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  ter  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  po več letih okrevanja pri sobni temperaturi. Glavne ugotovitve eksperimenta so [25]:

### 3.3. Okrevanje polprevodniških detektorjev pri povišani temperaturi

- Obsevani APD še vedno delujejo kot fotodetektorji
- Temni tok narašča linearno s  $\Phi_{eq}$
- Temni tok se močno zmanjša z zmanjševanjem temperature ( $\approx 2,2$ -krat na  $10^\circ C$ )
- $V_{praga}$  naraste z večanjem  $\Phi_{eq}$

Skupina, ki se ukvarja z elektromagnetnimi kalorimetri v okviru CMS detektorja (*ang. compact muon selenoid*) velikega hadronskega trkalnika (*ang. Large hadron collider* - LHC), je opravila raziskavo vpliva okrevanja APD pri povišani temperaturi na odpravo sevalnih poškodb. APD proizvajalca Hamamatsu so bile obsevane z nevtroni s fluencami do  $\Phi_{eq} = 2,7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Okrevanje pri povišani temperaturi je potekalo pri sobni temperaturi. Začela se je 10 min po obsevanju, sama meritev pa je trajala več kot 200 dni. Ugotovitve eksperimenta so pokazale, da se temni tok eksponentno zmanjšuje s časom (Slika 3.7)



Slika 3.7: Odvisnost temnega toka od časa okrevanja APD pri sobni temperaturi. Slika je povzeta po [26].

Ker prihaja do rekombinacije ter odprave sevalnih poškodb že pri sobni temperaturi, smo obsevane vzorce med našimi meritvami shranjevali v zamrzovalni skrinji.

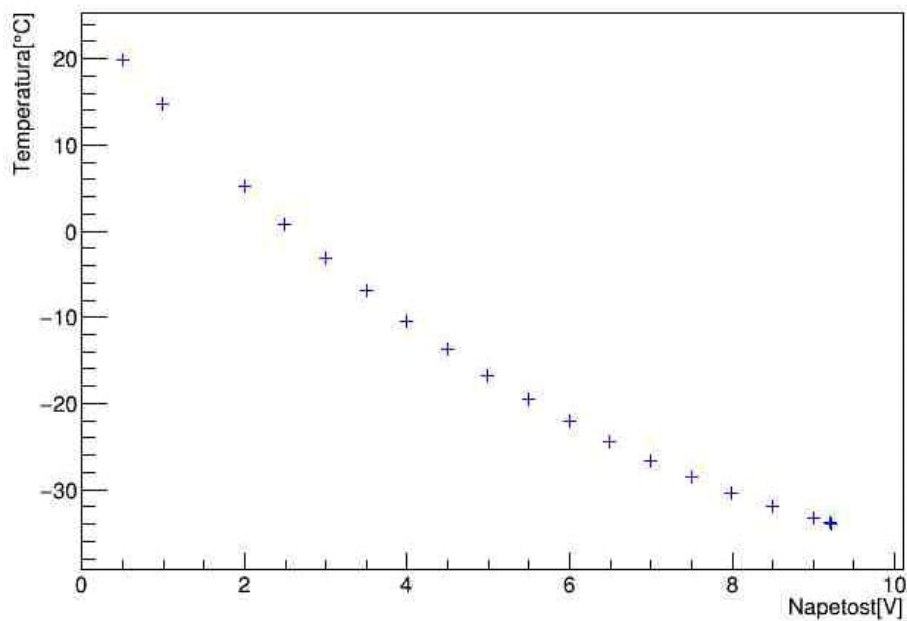


# Poglavje 4

## Postavitev eksperimenta

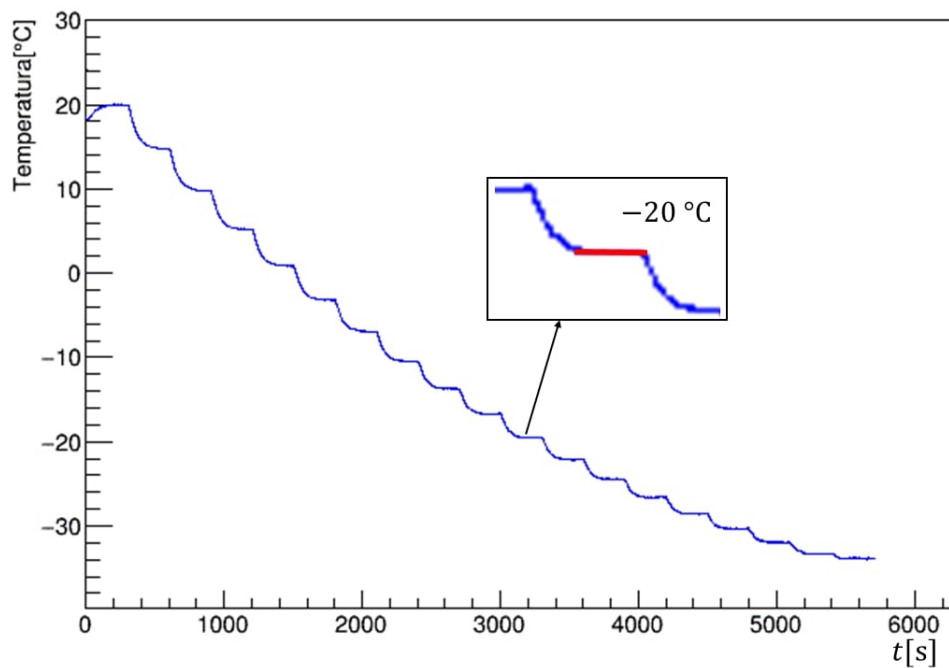
Vsak komplet detektorjev različnih proizvajalcev je vseboval 5 SiPM. Od tega so bile 3 neobsevane, 2 pa smo obsevali z nevtroni v poskusnem jedrskem reaktorju TRIGA v Brinju pri Ljubljani. Eno celico smo obsevali s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , drugo pa s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Po obsevanju so bili obsevani detektorji med meritvami shranjeni v zamrzovalni skrinji. Meritve smo izvajali na obeh obsevanih ter enem neobsevanem detektorju. Preostala neobsevana detektorja smo shranili za uporabo v morebitnih nadaljnjih meritvah.

Eksperiment je bil postavljen na inštitutu Jožef Stefan na oddelku za Eksperimentalno fiziko jedra in osnovnih delcev. Na začetku eksperimentalnega dela smo lastnosti silicijevih fotopomnoževalk merili pri temperaturah od  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  ter vmes po korakih vsakih  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Silicijeva fotopomnoževalka je bila postavljena na elektronsko tiskanino, s pomočjo katere smo dovedli ustrezno napetost  $V_{\text{overvoltage}}$  ter vodili nastal signal do osciloskopa oziroma računalnika. Svetlobo smo do SiPM vodili s pomočjo enorodovnega optičnega vodnika Th 460HP. Skupaj z elektronsko tiskanino je bila silicijeva fotopomnoževalka postavljena na Peltierjev element TEC4 - 24603, s pomočjo katerega smo dosegli želeno temperaturo. Peltierjev element smo na eni strani hladili z vodo, ki je krožila od posode z vodo do peltierjevega elementa in nazaj. Konstantno temperaturo vode v posodi smo vzdrževali z ventilatorjem. S pomočjo temperaturnih senzorjev priključenih na mikrokrmilnik Arduino, smo spremljali temperaturo SiPM. Da bi dosegli želeno temperaturo, je izvor napetosti *TEXIO regulated DC power supply PA250-0.42B* od mikrokrmilnika sprejemal podatke o trenutni temperaturi ter prilagodil napetost na Peltierjevem elementu tako, da smo dosegli želeno temperaturo. Regulacija napetosti je potekala preko proporcionalno - integrirno - diferencialne (PID) regulacije. Na vrednost napetosti vplivajo trije členi. Proporcionalen člen (P) je sorazmeren razliki med trenutno temperaturo ter temperaturo, ki jo želimo doseči, diferencialen člen (D) je sorazmeren hitrosti spreminjanja razlike med trenutno temperaturo ter želeno temperaturo, integralen člen (I) pa je sorazmeren integralu razlike med trenutno in želeno temperaturo ter skrbi za to, da sistem ohrani parametre, pri katerih je odstopanje padlo na nič. Iskanje optimalne vrednosti členov pri našem eksperimentu je zahtevalo veliko poskušanja. Temperaturno področje smo morali razdeliti na intervale, saj nismo mogli določiti vrednosti, ki bi delovale na celotnem področju. Temperaturno področje smo razdelili na naslednje intervale:  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $P = 2.4$ ,  $I = 0.17$ ,  $D = 0.054$ ),  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $P = 2.4$ ,  $I = 0.1$ ,  $D = 0.095$ ) in  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $P = 2.4$ ,  $I = 0.07$ ,  $D = 0.1$ ). Odvisnost temperature od dovedene napetosti je prikazana na sliki 4.1.



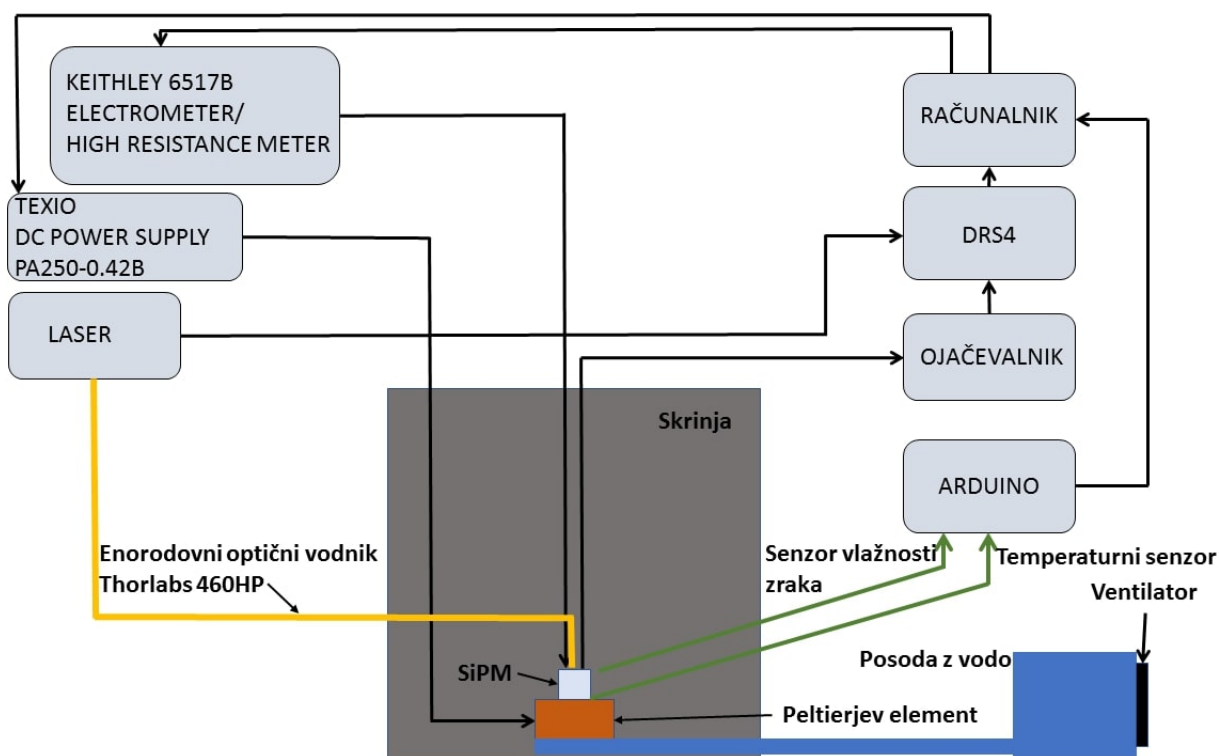
Slika 4.1: Odvisnost temperature SiPM od napetosti dovedene na Peltierjev element.

Zaradi časa potrebnega, da je sistem dosegel želeno temperaturo, je meritev pri vseh temperaturah trajala precej časa (Slika 4.2).



Slika 4.2: Odvisnost temperature SiPM od časa. Meritve smo izvajali, ko se je temperatura ustalila (rdeče področje na sliki - primer za meritev pri  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

SiPM je bila skupaj z elektronsko tiskanino, optičnim vodnikom, temperaturnimi senzorji, napetostnimi vodniki ter Peltierjevim elementom zaprta v skrinji, ki je preprečevala svetlobi iz okolice, da bi vpadla na SiPM. Da ne bi prišlo do kondenzacije vlage na SiPM, smo preko detektorja vodili suh zrak. Obenem smo v skrinji imeli nameščen detektor relativne vlažnosti zraka in smo meritev začeli šele, ko je vlažnost zraka dosegla ustrezno vrednost. Ustrezno napetost na SiPM smo uravnavali s pomočjo računalnika, ki je bil povezan z izvorom napetosti *Keithley 6517B electrometer/high resistance meter*. Signal iz SiPM smo vodili do ojačevalnika ter nato dalje do 4-kanalnega vzorčevalnika signalov DRS4 in od tam do računalnika. Kot sprožilec dogodka smo uporabili signal iz laserja, ki smo ga vodili do DRS4. Shema postavitve eksperimenta je predstavljena na sliki 4.3.



Slika 4.3: Shematski prikaz začetnega eksperimenta.

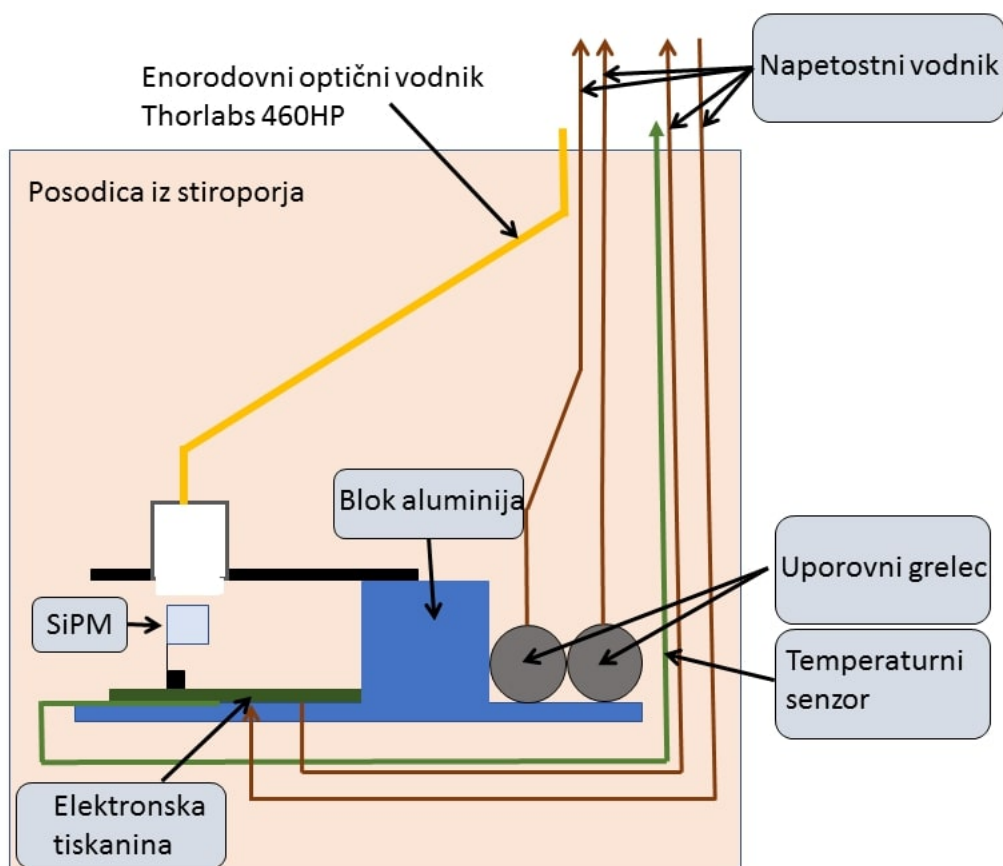
Ker obsevane silicijeve fotopomnoževalke pri temperaturi  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  in višje niso bile sposobne zaznavati posameznih fotonov, smo se odločili meritve izvesti pri nižjih temperaturah.

SiPM je bila skupaj z aluminijevim blokom, ohmskimi uporniki, elektronsko tiskanino, temperaturnim senzorjem, optičnim vlaknom ter vodniki, s katerimi smo dovajali ustrezno napetost ter razbirali nastal signal, zaprta v posodici iz stiropora, ki je zagotavljala ustrezno termično izolacijo. SiPM smo namreč potopili v posodo s tekočim dušikom, ki je ohladil vsebino do temperature  $-187\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kar je bila tako tudi najnižja temperatura pri kateri smo lahko izvajali meritve. Temperaturo vsebine posodice smo s pomočjo uporovnih grelcev povečevali do višjih vrednosti, pri

## Poglavje 4. Postavitev eksperimenta

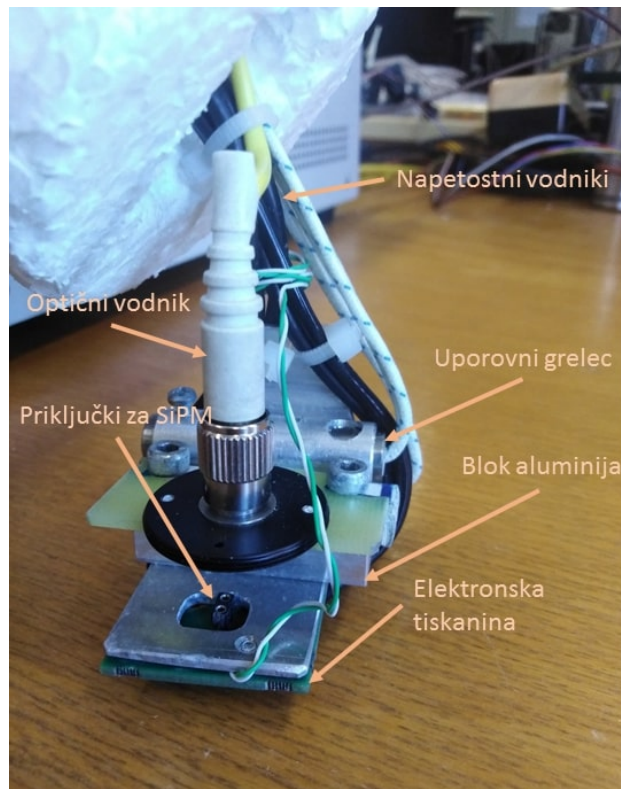
katerih smo želeli opraviti meritve.

Silicijeva fotopomnoževalka je bila postavljena na aluminijev blok, ki smo ga gregli s pomočjo uporovnega grelca ter tako posredno segrevali tudi SiPM. Uporabljali smo dva vzporedno vezana uporovna grelca, priključena na izvor napetosti *TEXIO regulated DC power supply PA250-0.42B*, s katerim smo spreminjali električno napetost ter s tem moč grelca. Svetlobo smo z optičnim vlaknom vodili od optičnega laserja do SiPM. Shema postavitve SiPM, elektronske tiskanine, ohmskih upornikov, napetostnih vodnikov, bloka aluminija, temperaturnega senzorja ter optičnega vodnika v posodici iz stiropora, je prikazana na sliki 4.4, praktična izdelava pa na sliki 4.5:



Slika 4.4: Shema postavitve SiPM, elektronske tiskanine, uporovnih grelcev, napetostnih vodnikov, bloka aluminija, temperaturnega senzorja ter optičnega vodnika v posodici iz stiropora.





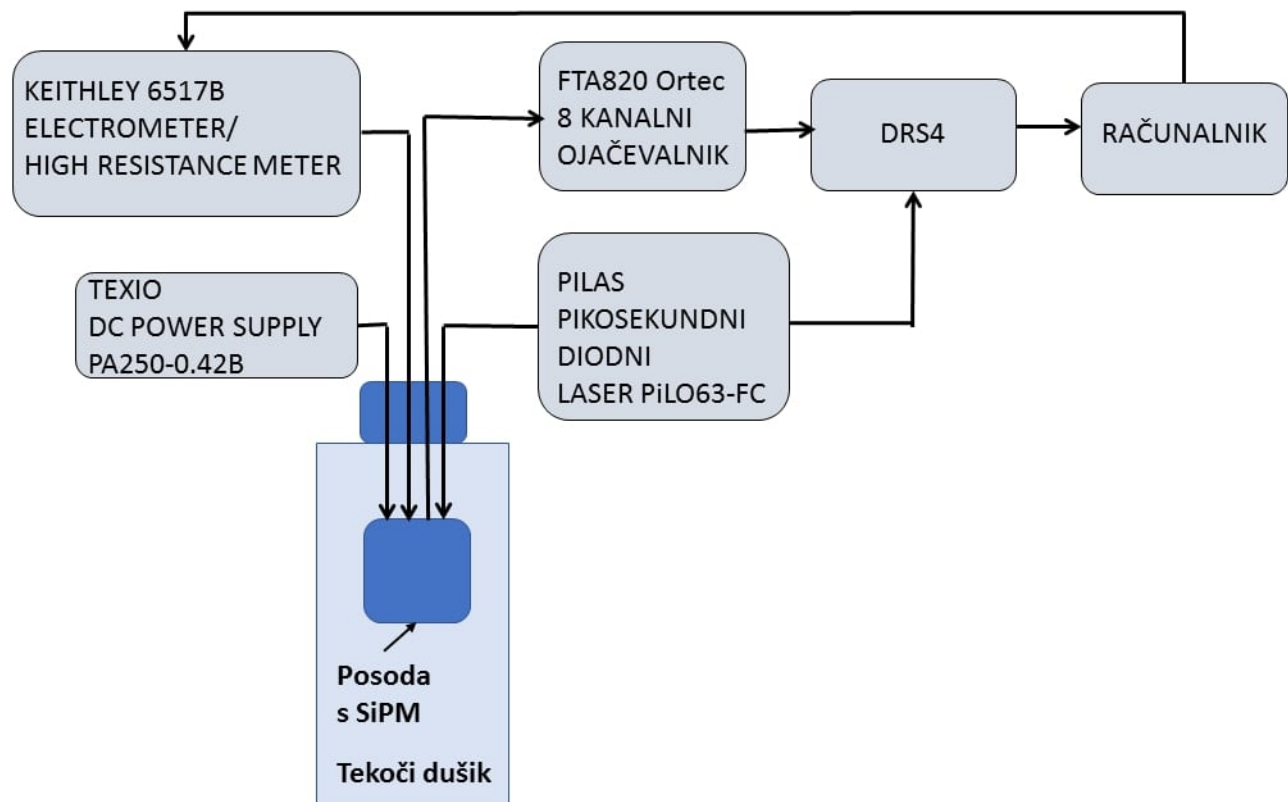
Slika 4.5: Aluminijev blok z dvema uporovnima grelcema, svetlobni vodnik, elektronska tiskanina ter vodniki, s katerimi na SiPM dovajamo ustrezno napetost ter vodimo signal do ojačevalnika ter dalje do DRS4.



Slika 4.6: Posodica iz stiropora, ki zagotavlja ustrezno termično izolacijo SiPM.

## Poglavje 4. Postavitev eksperimenta

Ustrezno napetost na SiPM smo, podobno kot pri eksperimentu pri višjih temperaturah, uravnavali s pomočjo računalnika, ki je bil povezan z izvorom napetosti *Keithley 6517B electrometer/high resistance meter*. Signal iz SiPM smo vodili do 8 kanalnega ojačevalnika *FTA820 Ortec* ter nato dalje do 4-kanalnega vzorčevalnika signalov DRS4 in od tam do računalnika. Kot sprožilec dogodka smo uporabili signal iz laserja (*Pilas pikosekundni diodni laser PiLO63-FC*), ki smo ga vodili do DRS4. Shematska postavitev eksperimenta je prikazana na sliki 4.7.

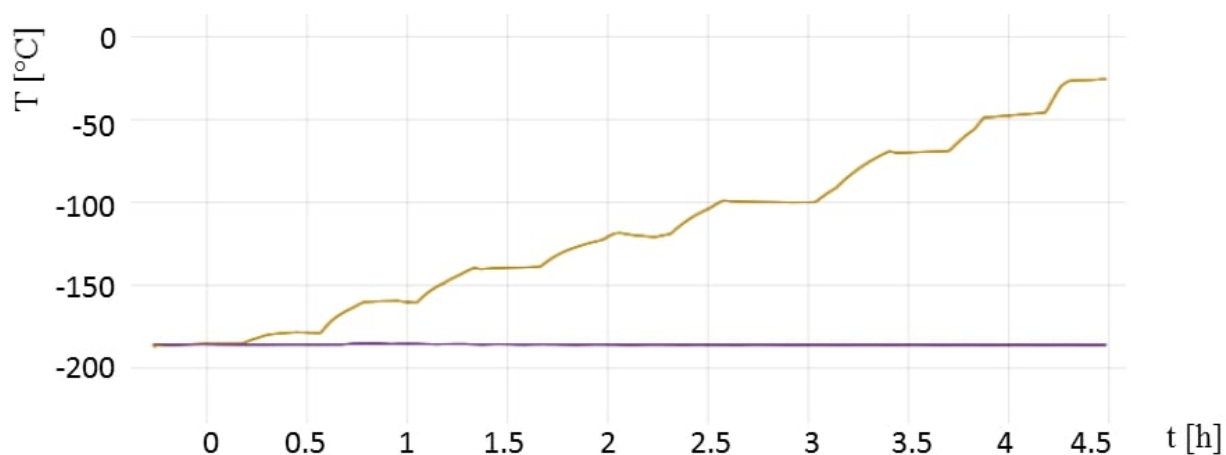


Slika 4.7: Shematski prikaz postavitve eksperimenta.

Posoda s tekočim dušikom je skonstruirana tako, da vsebina ni potopljena v sam tekoči dušik. Stene posode so iz poroznega materiala, ki absorbira tekoči dušik, tako, da je vsebina posode na suhem. Da vsebina posode doseže temperaturo tekočega dušika, je potrebno posodo napolniti, počakati, da se tekoči dušik absorbira ter to ponoviti trikrat. Šele takrat so stene posode absorbirale dovolj tekočega dušika, da ustrezno hladijo vsebino dovolj časa. Meritve so bile dolgotrajne, saj je bil čas, potreben, da smo SiPM segreli na željeno temperaturo, dolg. Tipičen profil spremijnjanja temperature SiPM v odvisnosti od časa med eno meritvijo je na sliki 4.9.



Slika 4.8: Posoda s tekočim dušikom.



Slika 4.9: Odvisnost temperature ( $T$ ) SiPM od časa ( $t$ ). Vijolična premica predstavlja temperaturo posode.

Ker smo SiPM v posodico iz stiropora postavili zmeraj malo drugače, same posodice pa prav tako nismo zmeraj zaprli na enak način, je bila tudi toplotna zaščita vsebine posodice pri vsaki meritvi različna. Posledično nismo mogli določiti preproste odvisnosti temperature SiPM od napetosti, dovedene na uporabna grelca, temveč smo z ročnim prilagajanjem napetosti dobili ustrezno temperaturo. Temperaturo v posodi s tekočim dušikom ter temperaturo SiPM smo merili s temperaturnimi senzorji (*termoelement tip K*), priključenimi na merilnik temperature Pico Technology USB tc-8. Po obsevanju smo vsako celico segrevali pet zaporednih tednov pri tempe-

## Poglavje 4. Postavitev eksperimenta

---

raturi  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ter po vsakem tednu spremljali njihovo okrevanje. Celice smo segrevali v grelni komori SP-120.

Pri meritvah smo uporabljali silicijeve fotopomnoževalke dveh različnih proizvajalcev (Tabela 4.1). Karakteristike silicijevih fotopomnoževalk, ki smo jih uporabljali pri meritvah, so zbrane v tabeli 4.2 (MicroFJ-30035) in tabeli 4.3 (Hamamatsu 3050PE). Proizvajalec navaja karakteristike pri sobni temperaturi.

Proizvajalec	model	velikost [mm]
Hamamatsu	3050PE	3 x 3
ON Semiconductor	MicroFJ-30035	3 x 3

Tabela 4.1: Silicijeve fotopomnoževalke uporabljene pri meritvah.

Interval občuljivosti [nm]	Vrh občuljivosti ( $\lambda_v$ ) [nm]	Učinkovitost zaznave fotonov pri $\lambda_v$ [%]	Kapacitivnost [pF]	$V_{prag}$ [V]
320 - 900	450	40	320	$53 \pm 5$

Tabela 4.2: Karakteristike Hamamatsu 3050PE [27].

Interval občuljivosti [nm]	Vrh občuljivosti ( $\lambda_v$ ) [nm]	Učinkovitost zaznave fotonov pri $\lambda_v$ [%]	Kapacitivnost [pF]	$V_{prag}$ [V]
300 - 900	420	38	1070	$24.5 \pm 0.3$

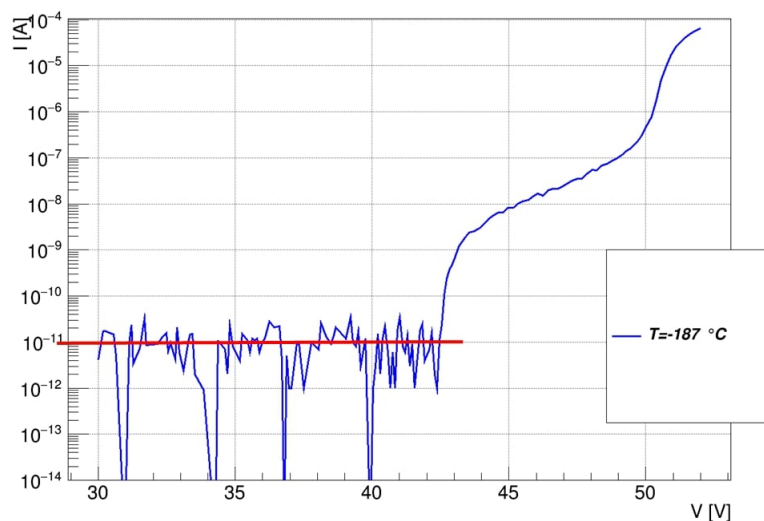
Tabela 4.3: Karakteristike MicroFJ-30035 [28].

# Poglavje 5

## Rezultati

### 5.1 Pragovna napetost v odvisnosti od temperature

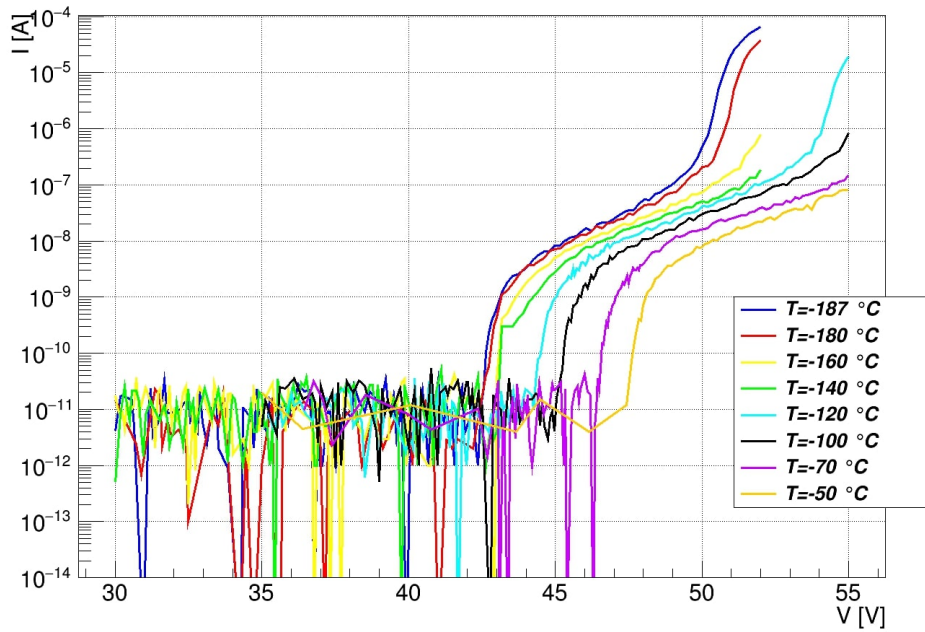
Proizvajalec podaja vrednost pragovne napetosti pri sobni temperaturi. Ker smo meritve izvajali tudi pri temperaturah, ki so nižje od sobne, smo najprej določili  $V_{prag}$  pri teh temperaturah.  $V_{prag}$  pri določeni temperaturi smo določili tako, da smo s pomočjo napetostnega izvora *Keithley 6517B Electrometer/High resistance meter*, ki je hkrati tudi ampermeter, povečevali napetost na silicijevi fotopomnoževalki ter merili tok, ki teče skozi njo. Tako smo izmerili  $I(V)$  karakteristiko silicijeve fotopomnoževalke. S prilagajanjem smo na grafu določili točko preloma, ki je enaka  $V_{prag}$ , kjer fotopomnoževalka začne prevajati električni tok (Slika 5.1). Točko preloma smo določili tako, da smo najprej vzeli 20 meritev na grafu  $I(V)$  ter nanje prilagodili premico. Začetno vrednost prilagojene premice smo označili z  $n$ . Potem smo šli po vseh meritvah do točke, pri kateri je vrednost logaritma toka večja kot  $1 + \log(n)$ . Pri tej točki smo poiskali vrednost napetosti in jo vzeli za naš  $V_{prag}$ .



Slika 5.1: Določanje  $V_{prag}$  iz  $I(V)$  karakteristike neobsevane SiPM Hamamatsu 3050PE.

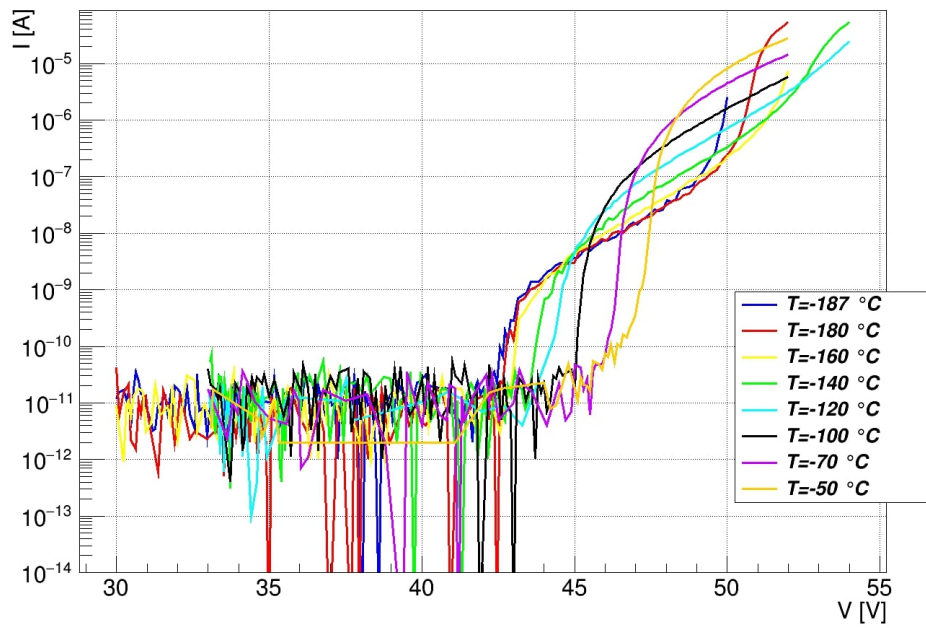
## Poglavje 5. Rezultati

$I(V)$  karakteristiko smo izmerili za neobsevano celico, obe obsevani pred segrevanjem ter obe obsevani po vsakem tednu segrevanja. Meritve smo izvedli pri temperaturah  $-187\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ter v primeru celic, ki so pokazale okrevanje po segrevanju, tudi pri temperaturah  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  in  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

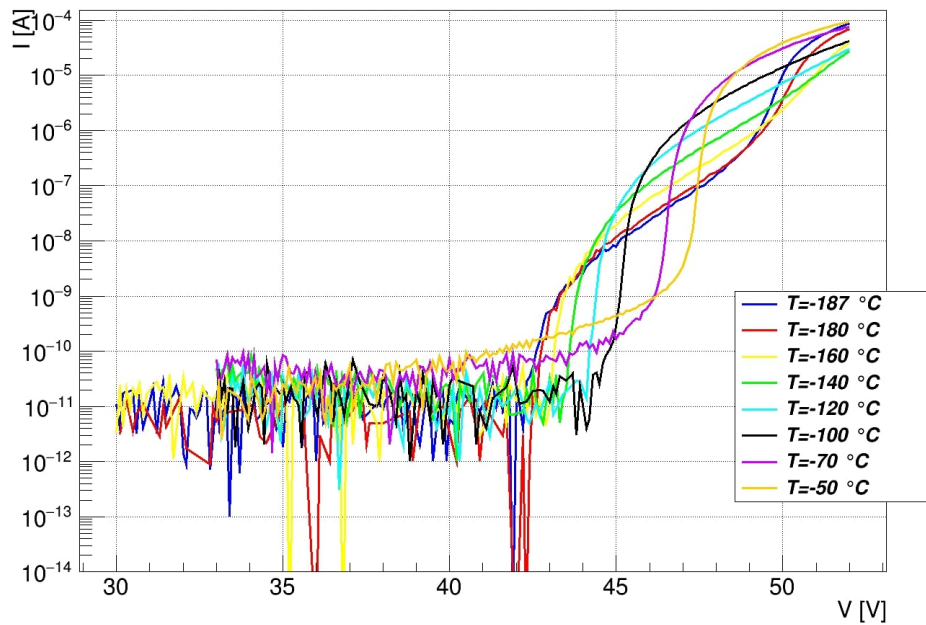


Slika 5.2:  $I(V)$  karakteristika neobsevane SiPM Hamamatsu 3050PE.

## 5.1. Pragovna napetost v odvisnosti od temperature



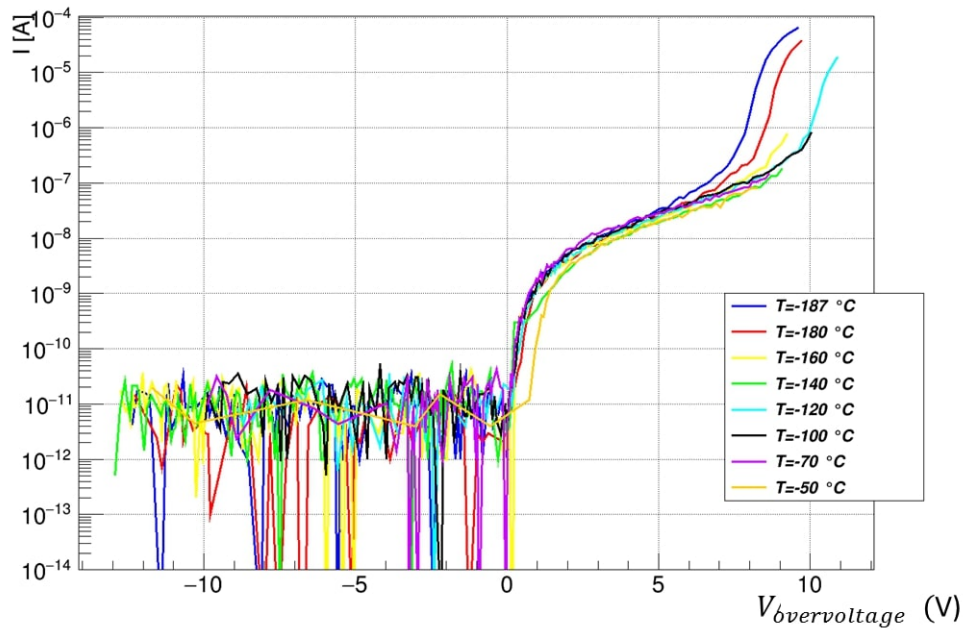
Slika 5.3:  $I(V)$  karakteristika Hamamatsu 3050PE SiPM obsevane s  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .



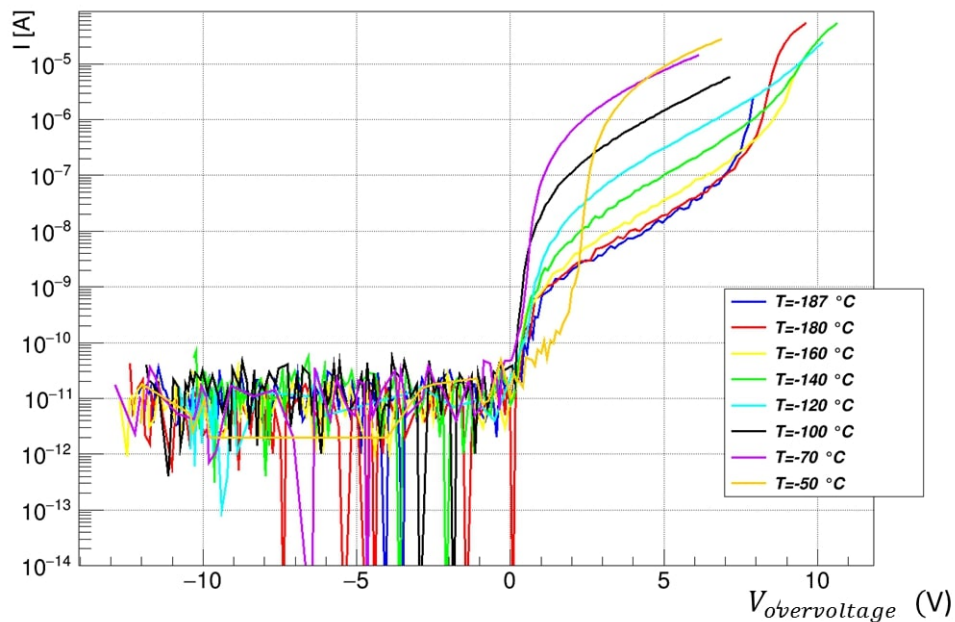
Slika 5.4:  $I(V)$  karakteristika Hamamatsu 3050PE SiPM obsevane s  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

## Poglavje 5. Rezultati

Ker se  $V_{prag}$  spreminja s temperaturo, je bolj nazorno risati grafe odvisnosti toka ( $I$ ) od napetosti nad pragom ( $V_{overvoltage}$ ), saj so tako meritve pri različnih temperaturah poravnane pri  $V_{prag}$ .

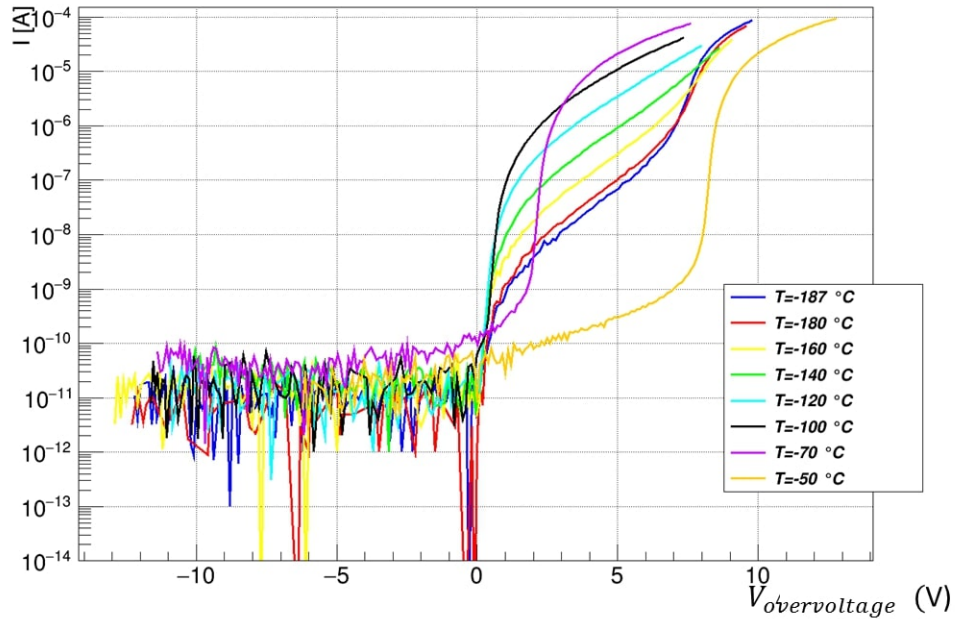


Slika 5.5: Odvisnost toka ( $I$ ) od  $V_{overvoltage}$  neobsevane SiPM Hamamatsu 3050PE.



Slika 5.6: Odvisnost toka ( $I$ ) od  $V_{overvoltage}$  Hamamatsu 3050PE SiPM obsevane s  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .

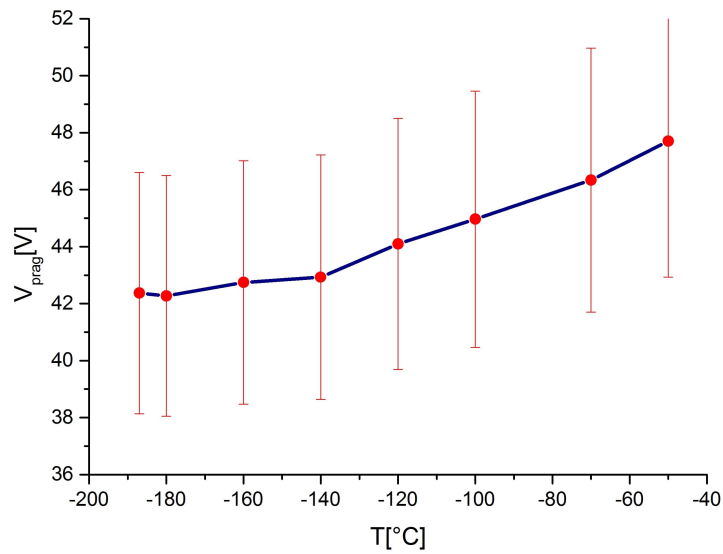




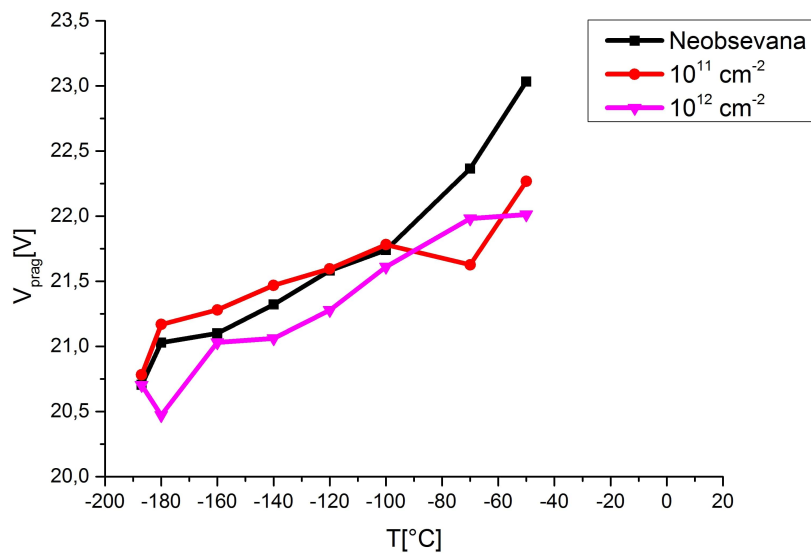
Slika 5.7: Odvisnost toka ( $I$ ) od  $V_{Overvoltage}$  Hamamatsu 3050PE SiPM obsevan s  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

Prost nosilec naboja sproži nove ionizacije ob trkih z atomi kristalne mreže v detektorju. Verjetnost za ionizacijo je odvisna od jakosti električnega polja, torej napetosti na detektorju ter od temperature. Z naraščanjem temperature se povečuje verjetnost za sipanje nosilcev naboja na kristalni mreži, s čimer se zmanjšuje njihova energija ter tako tudi verjetnost za nadaljnje ionizacije. Kot rezultat moramo povečati napetost na detektorju, da obdržimo enako število ionizacij. Makroskopsko to rezultira v povišanju  $V_{prag}$  [29]. Na sliki 5.8 vidimo, da  $V_{prag}$  narašča linearno s temperaturo.

Obsevanje SiPM z nevtroni povzroči povišanje pragovne napetosti SiPM, in sicer ta z višanjem fluence narašča. Vendar v primeru naših meritev pri fluencah  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  ter  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  takšnega trenda ni bilo mogoče izmeriti, kar je v skladu z meritvami vpliva obsevanja SiPM z različnimi fluencami nevtronov na pragovno napetost, opravljenih s strani S. Cerioli in sodelavcev, kjer je povišanje pragovne napetosti opazno komaj pri tri velikostne rede višjih fluencah kot v primeru naših meritev (Slika 3.5) [21]. Na sliki 5.9 do 5.12 so prikazane meritve odvisnosti pragovne napetosti od temperature za neobsevane ter obe obsevane SiPM pred segrevanjem in po petih tednih segrevanja.

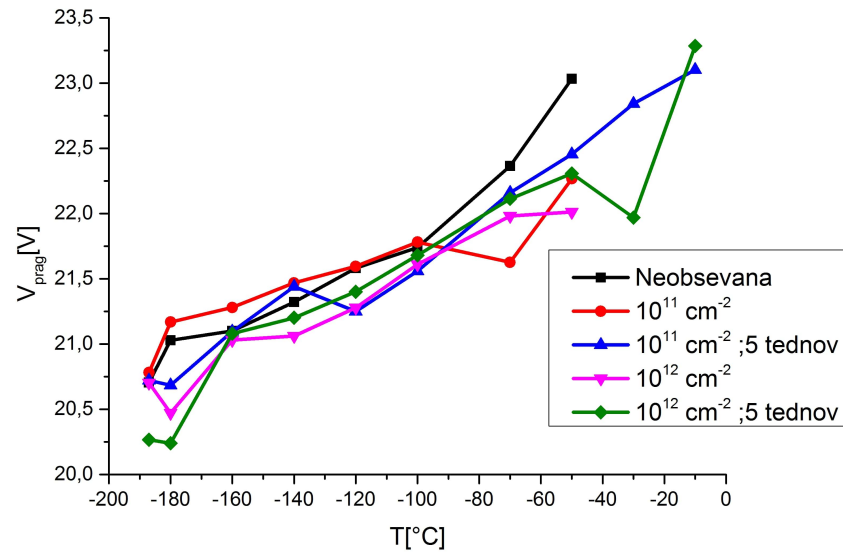


Slika 5.8: Odvisnost  $V_{prag}$  od  $T$  za neobsevano SiPM Hamamatsu 30035.

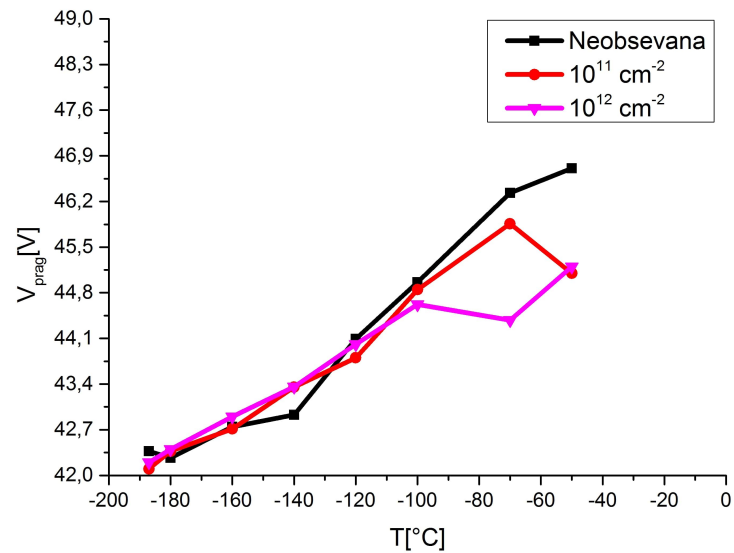


Slika 5.9: Primerjava odvisnosti  $V_{prag}$  od  $T$  za neobsevano ter obe obsevani celici MicroFJ-30035 pred segrevanjem.

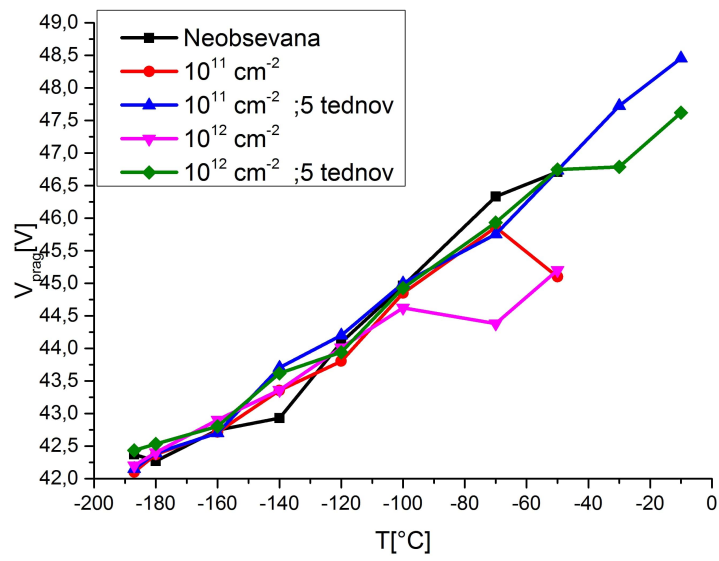
## 5.1. Pragovna napetost v odvisnosti od temperature



Slika 5.10: Primerjava odvisnosti  $V_{prag}$  od  $T$  za neobsevano ter obe obsevani celici MicroFJ-30035 pred in po segrevanju.



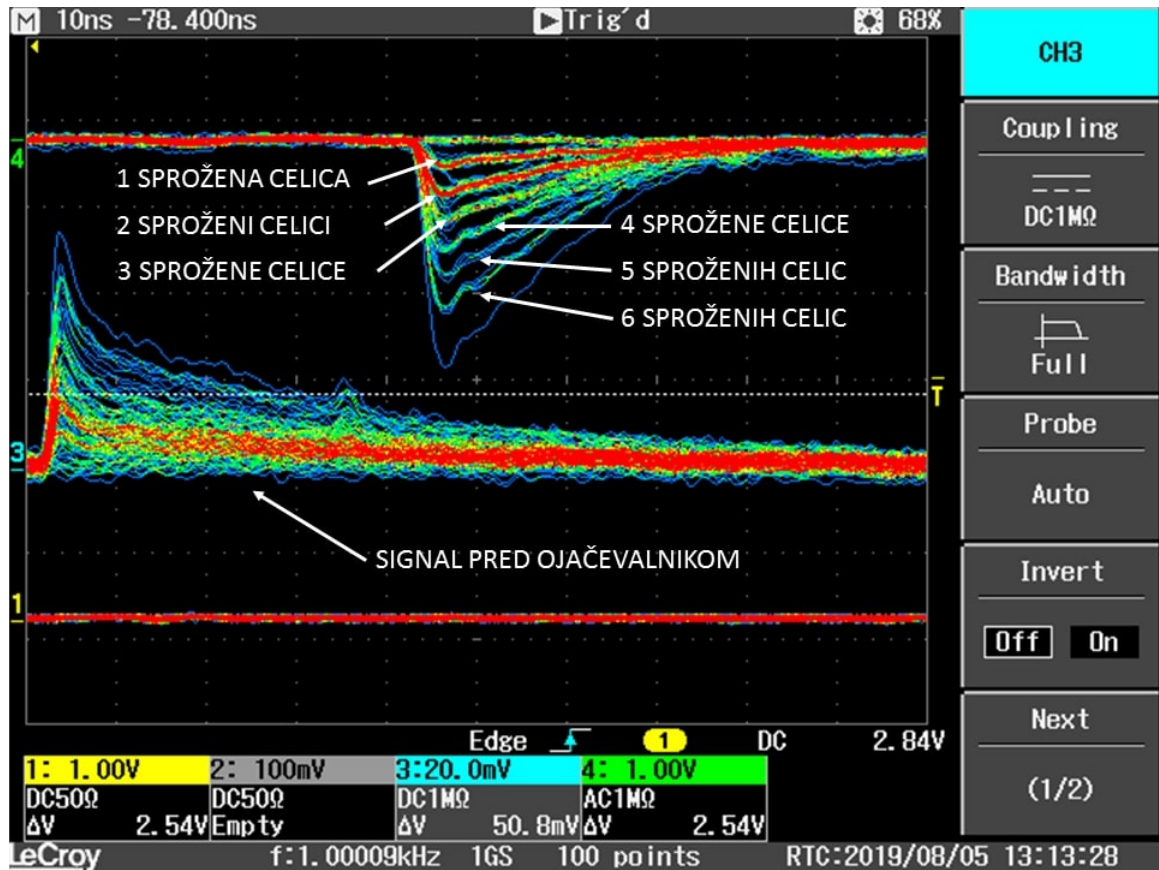
Slika 5.11: Primerjava odvisnosti  $V_{prag}$  od  $T$  za neobsevano ter obe obsevani celici Hamamatsu 3050PE pred segrevanjem.



Slika 5.12: Primerjava odvisnosti  $V_{prag}$  od  $T$  za neobsevane ter obe obsevane celici Hamamatsu 3050PE pred in po segrevanju.

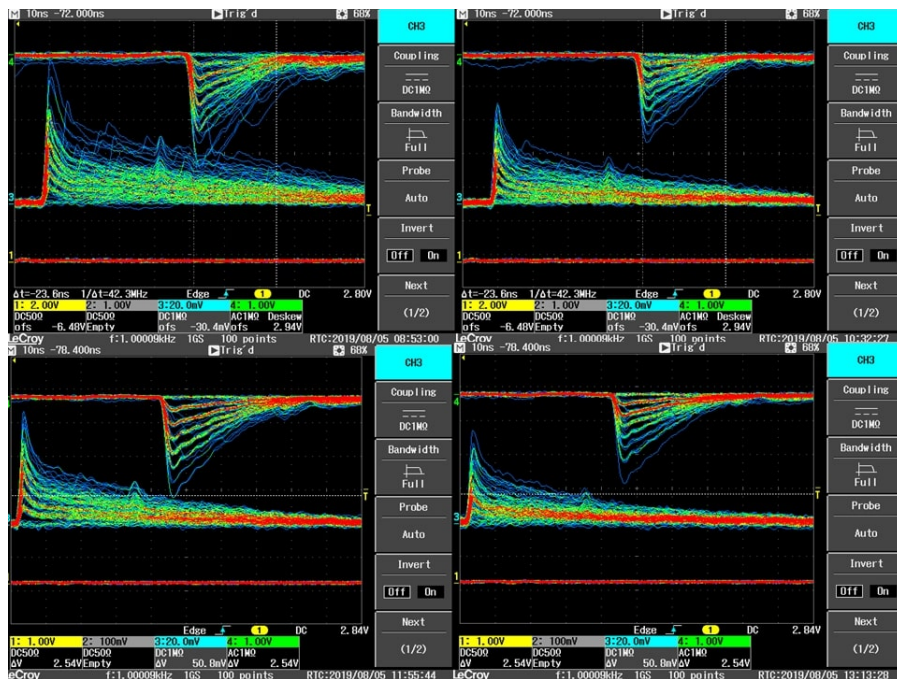
## 5.2 Meritev oblike signala

Meritev oblike signala (tok skozi SiPM v odvisnosti od časa) pri vpadu laserske svetlobe na silicijevo fotopomnoževalko smo izvedli pri različnih  $V_{\text{overvoltage}}$  ter različnih temperaturah. Na meritvi signala SiPM, ki jo zajamemo z osciloskopom, se proženje različnega števila celic kaže kot pulzi z različnimi amplitudami (Slika 5.13).

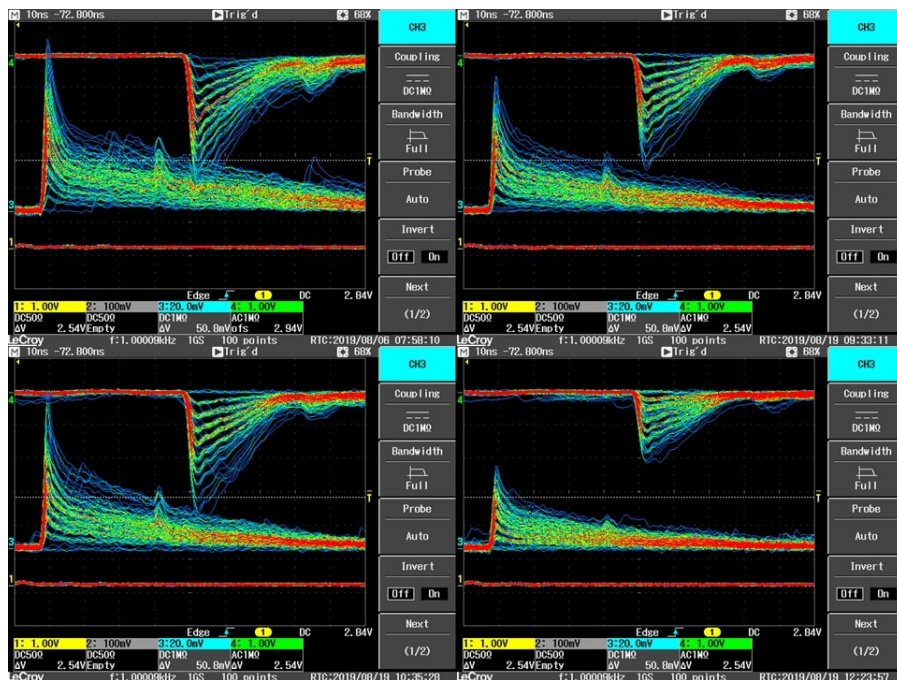


Slika 5.13: Zajem signala SiPM z osciloskopom. Različno število proženih celic se kaže v pulzih različnih amplitud. Signal je bil zajet na SiPM Hamamatsu 3050PE pri napetosti 4V nad pragom ter temperaturi  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

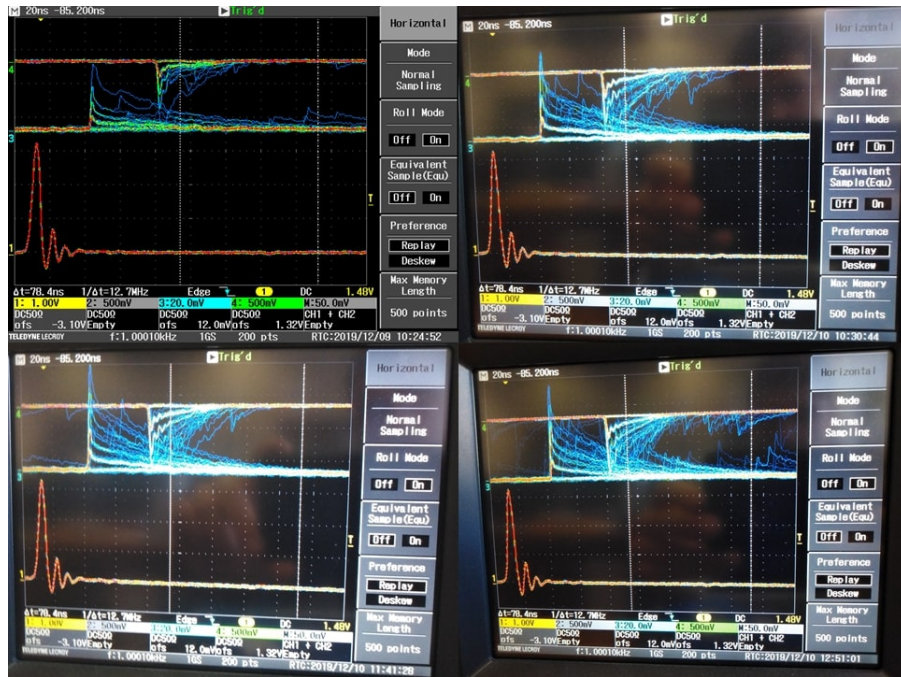
Meritve smo izvajali po korakih do maksimalne priporočene  $V_{\text{overvoltage}}$ . In sicer smo meritve serije Hamamatsu izvedli pri naslednjih vrednostih  $V_{\text{overvoltage}}$ :  $+1\text{ V}$ ,  $+2\text{ V}$ ,  $+3\text{ V}$ ,  $+4\text{ V}$  ter  $+5\text{ V}$ , meritve serije MicroFJ pa pri vrednostih  $V_{\text{overvoltage}}$ :  $+2\text{ V}$ ,  $+3\text{ V}$ ,  $+4\text{ V}$ ,  $+5\text{ V}$  ter  $+6\text{ V}$ . Zaradi nazornosti so predstavljene samo meritve pri temperaturah  $-187\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ter  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Prikazane so samo slike neobsevanih celic, celic po obsevanju ter celic po petih tednih segrevanja. Ostale meritve so prikazane v dodatku A.



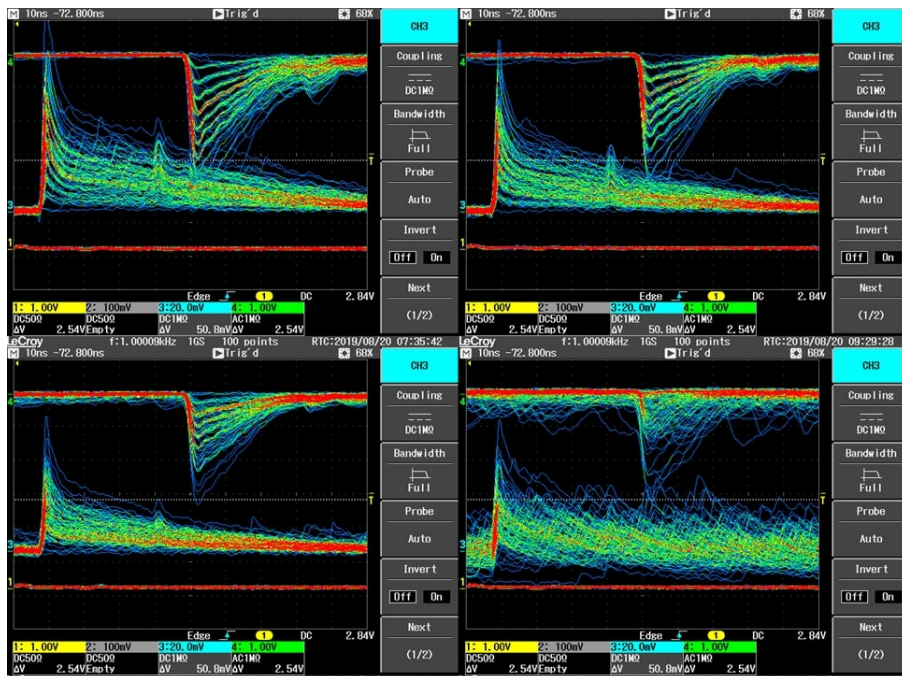
Slika 5.14: Signal neobsevane Hamamatsu 3050PE pri temperaturi  $-187\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{\text{overvoltage}} = +4\text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



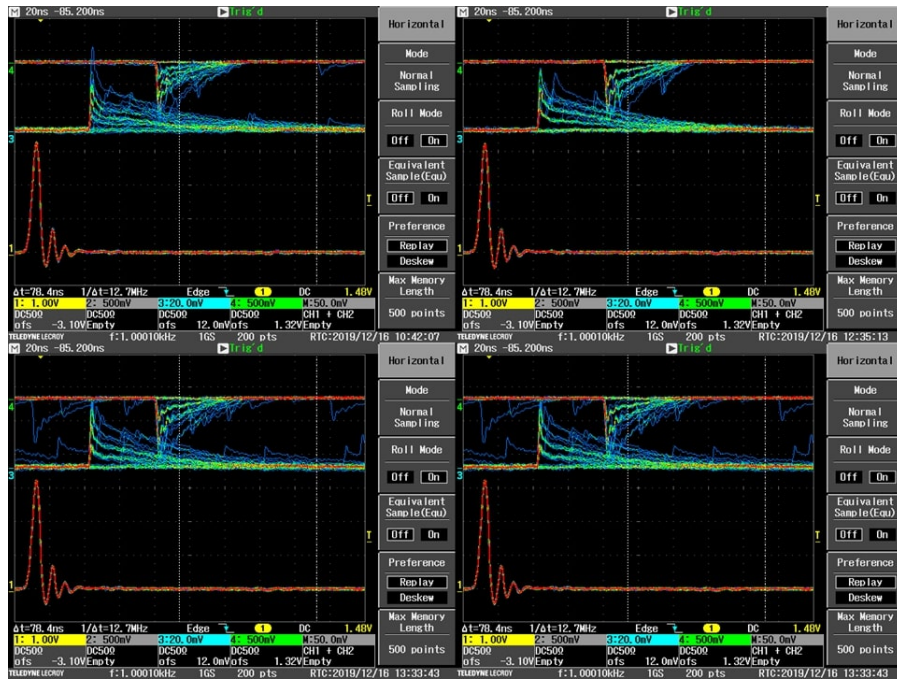
Slika 5.15: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11}\text{ cm}^{-2}$  pri temperaturi  $-187\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{\text{overvoltage}} = +4\text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



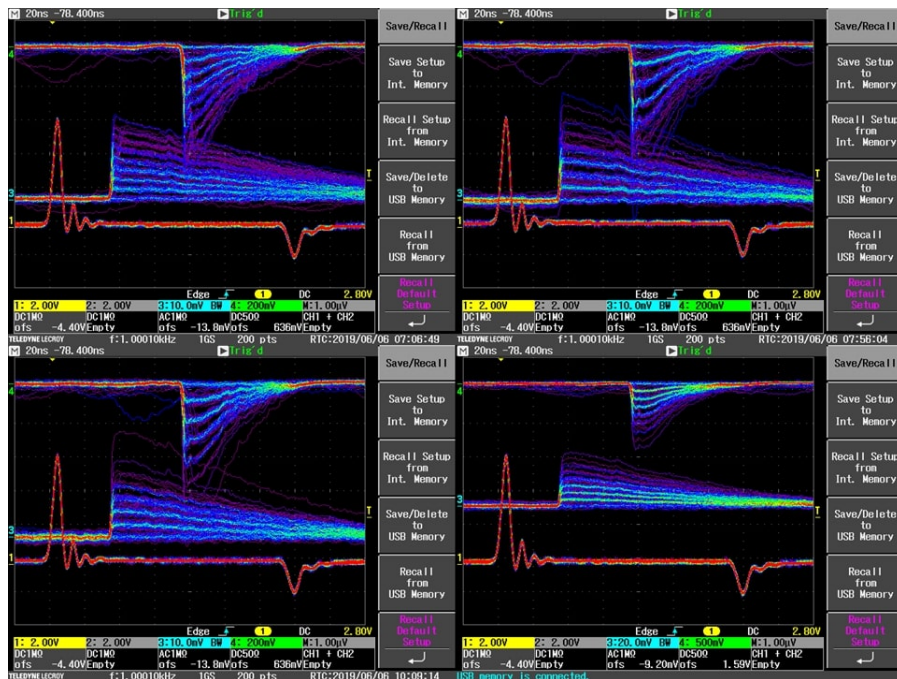
Slika 5.16: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 5 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



Slika 5.17: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  pri temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

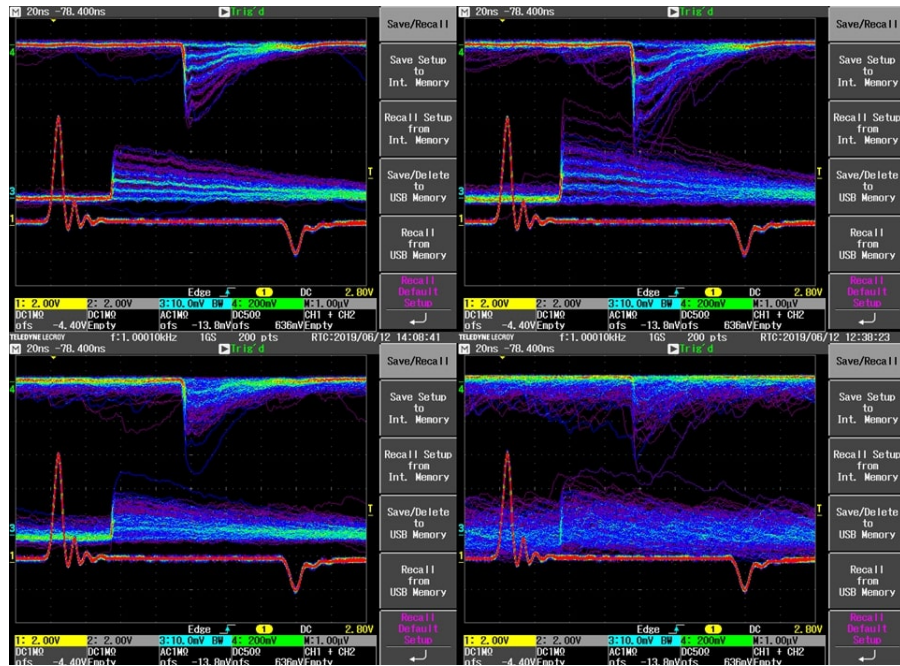


Slika 5.18: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 5 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

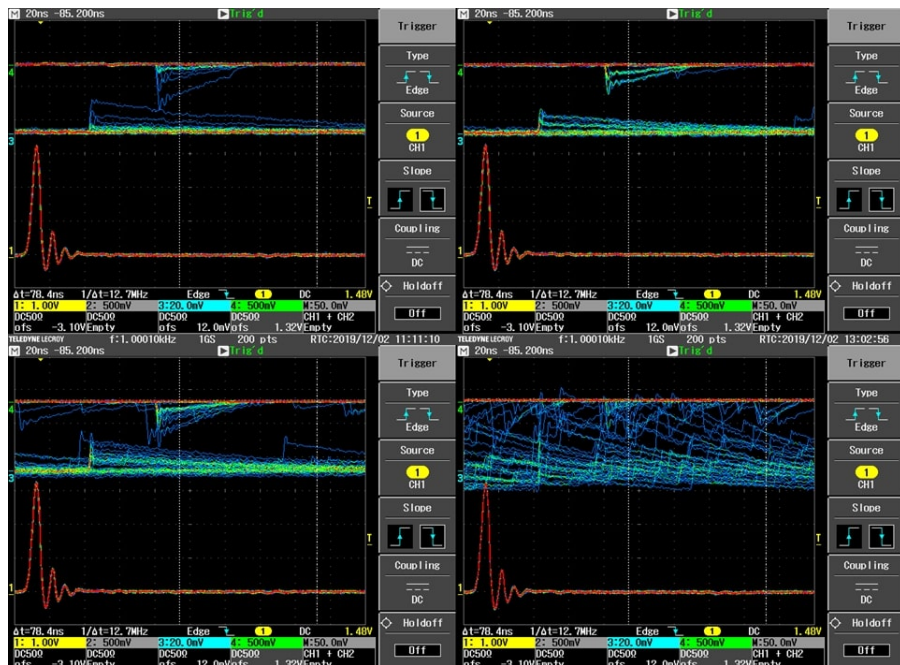


Slika 5.19: Signal neobsevane MicroFJ-30035 pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

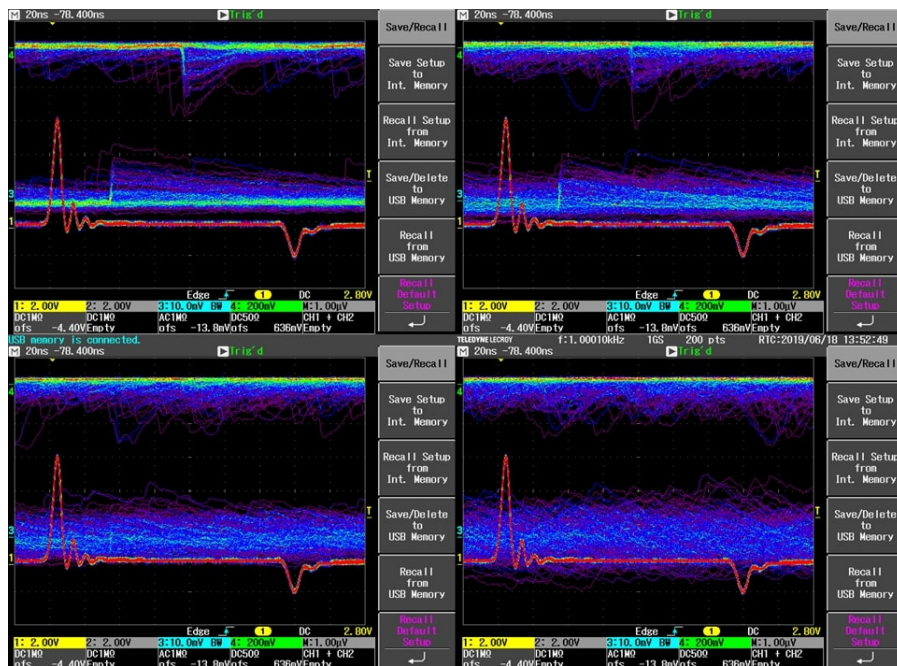




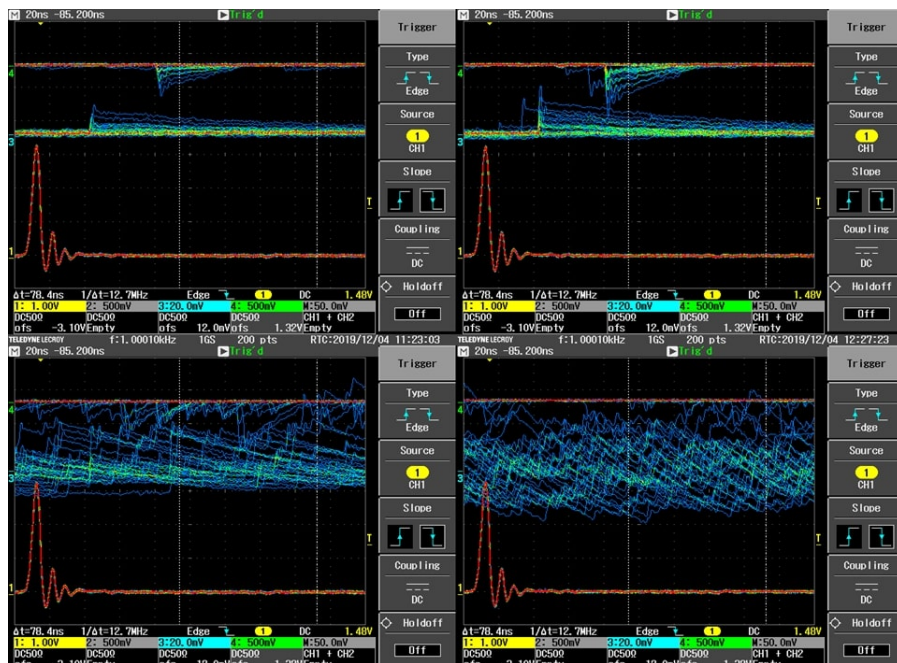
Slika 5.20: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{\text{overvoltage}} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



Slika 5.21: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 5 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{\text{overvoltage}} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



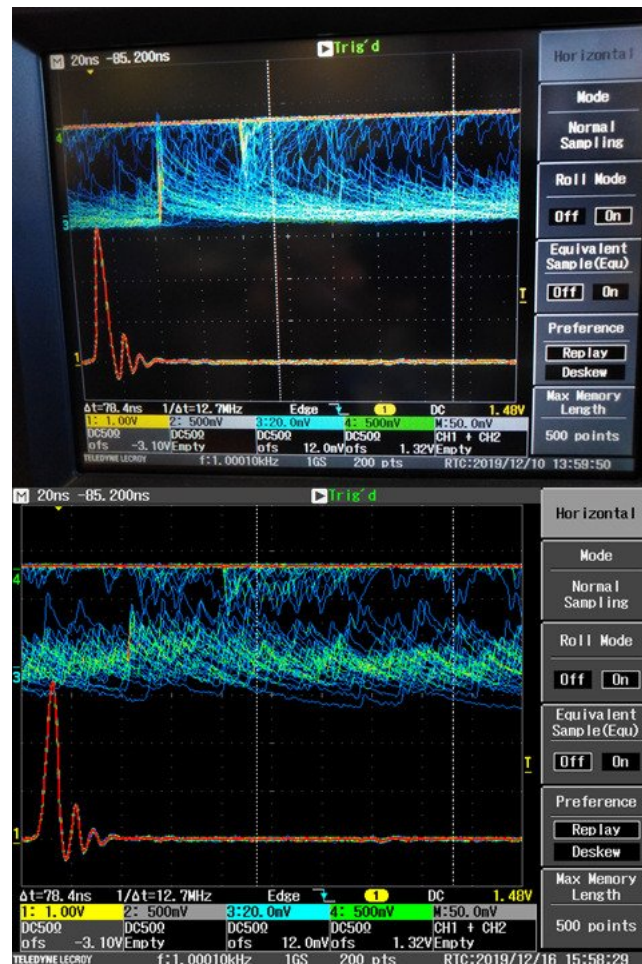
Slika 5.22: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



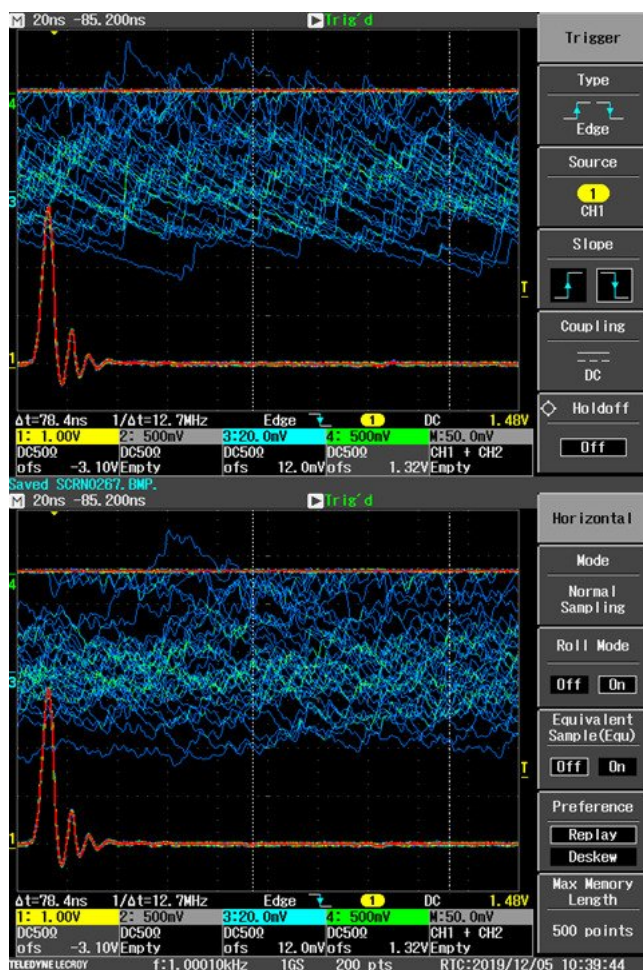
Slika 5.23: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 5 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

Vidimo, da so pri detektorju Hamamatsu 3050PE, obsevanem s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , signali, ki so posledica proženja različnega števila celic, razpoznavni pri vseh temperaturah do  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pri detektorju obsevanem s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  pa signalov posameznih celic ne prepoznamo več pri temperaturi  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

V primeru detektorja MicroFJ-30035 obsevanega s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  signale posameznih celic ne razločimo več jasno pri temperaturi  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ , v primeru detektorja obsevanega s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  pa zelo slabo celo pri najnižji temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tako pri detektorjih Hamamatsu 3050PE, kot MicroFJ-30035 velja, da se z vsakim tednom segrevanja temperatura, pri kateri postanejo signali posameznih celic razpoznavni, viša. Seveda je po enakem času segrevanja, pri celicah obsevanih s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  ta temperatura višja, kot pri celicah obsevanih s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Vzrok so sevalne poškodbe, zaradi katerih je šum višji. Z vsakim tednom segrevanja se odpravi več sevalnih poškodb, zaradi česar se zmanjša šum. Pri temperaturi  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  tudi po petih tednih segrevanja ne odpravimo dovolj sevalnih poškodb, da bi lahko razločili signale posameznih celic (Slika 5.24 in 5.25).



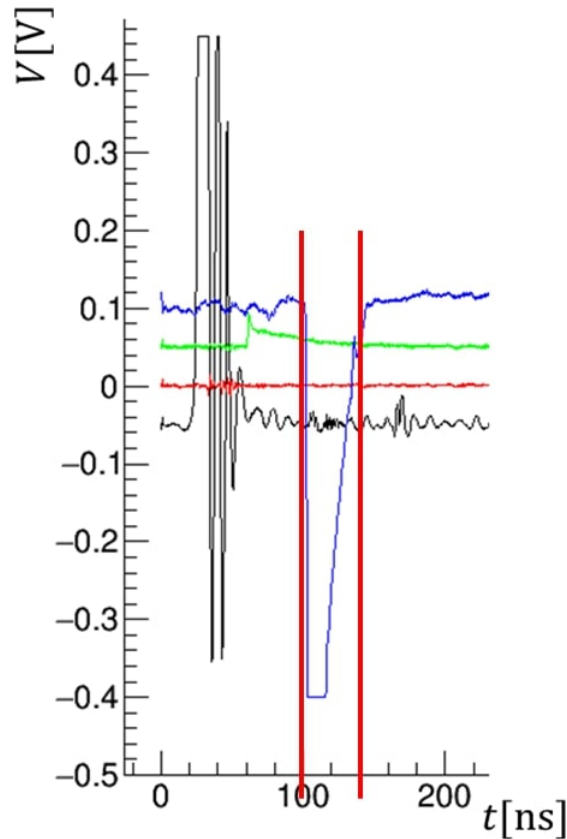
Slika 5.24: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  (Zgoraj) ter  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  (Spodaj), pri temperaturi  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  po 5 tednih segrevanja. Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



Slika 5.25: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  (Zgoraj) ter  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  (Spodaj), pri temperaturi  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  po 5 tednih segrevanja. Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

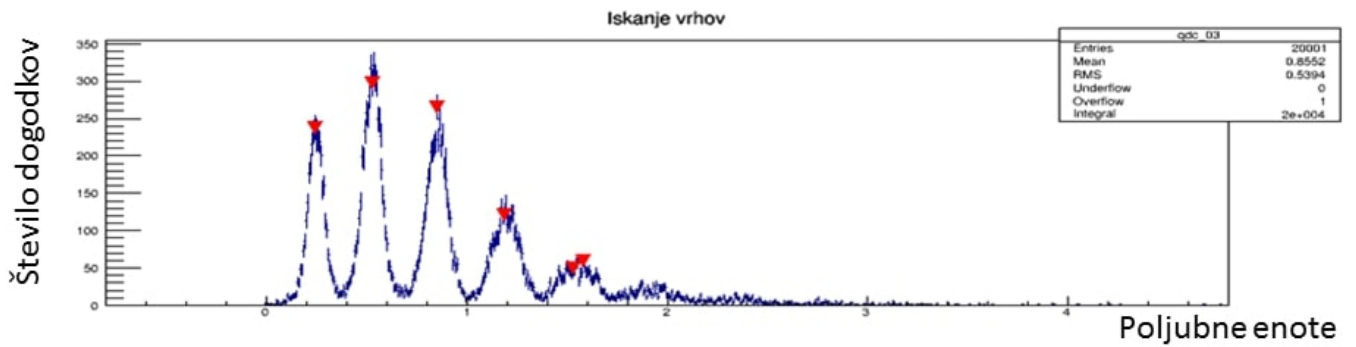
## 5.3 Meritev ojačenja SiPM

Signal, ki ga dobimo, ko SiPM zazna vpadle fotone, je sorazmeren naboju  $Q$ , ki ga zberemo med Geigerjevo razelektrivijo. Naboj je funkcija kapacitivnosti celice ter napetosti. Ojačanje SiPM je enako razmerju  $Q/e_0$ , pri čemer je  $e_0$  osnovni naboj. Na sliki 5.26 je označena zajeta oblika signala, ki ga dobimo z DRS4. Rdeči premici omejujeta integracijsko okno, ki ne sme biti predolgo, saj drugače integriramo preveč šuma.

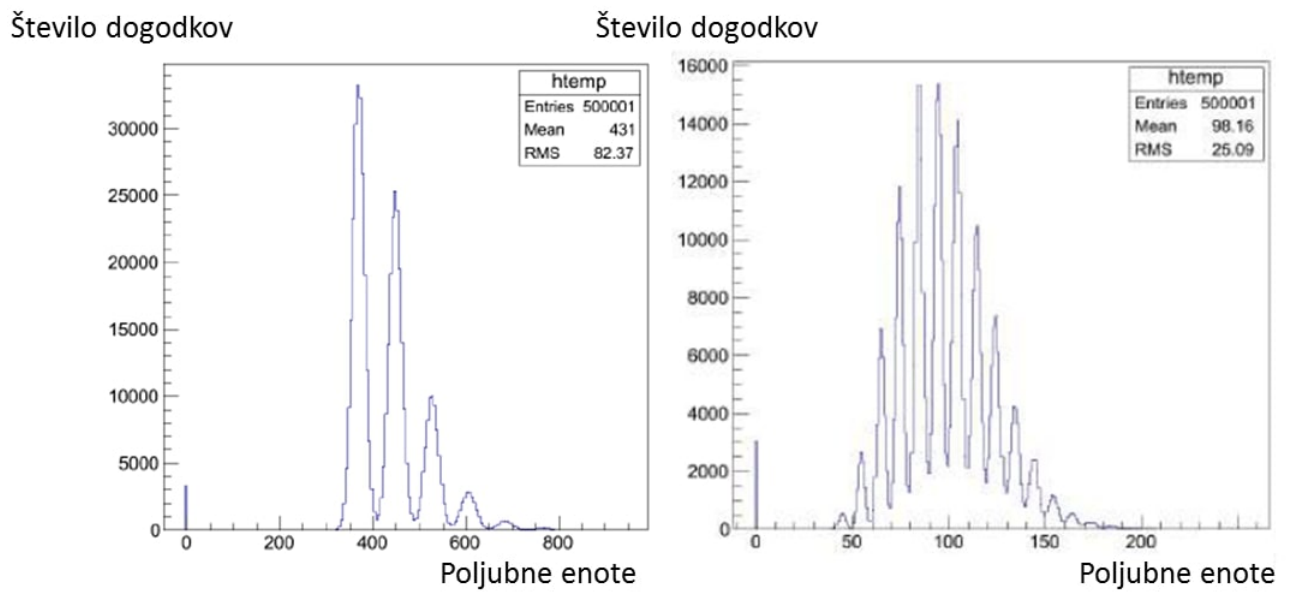


Slika 5.26: Oblika signala zajeta z DRS4. Signal je bil zajet z neobsevane Hamamatsu 3050P pri temperaturi  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ter  $V_{\text{overvoltage}} = +4\text{ V}$ . Rdeči premici omejujeta integracijsko okno. Črn signal je signal iz laserja, zelen je signal pred ojačevalnikom, moder pa je signal po ojačevalniku.

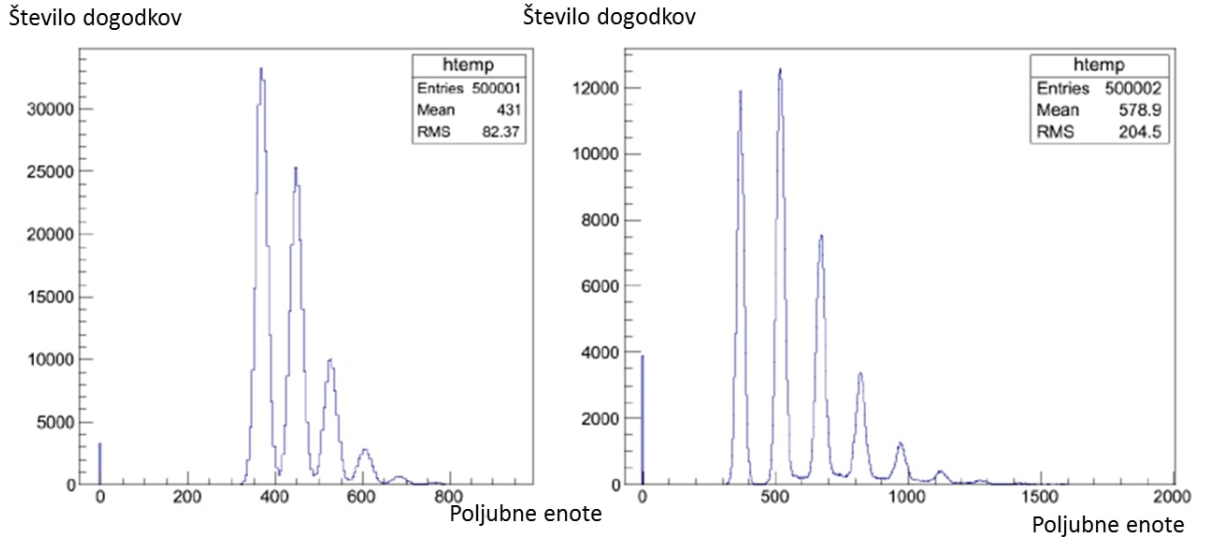
Za določanje ojačenja posamezne celice smo uporabili QDC (*Charge to digital converter*, ki v določenem časovnem oknu integrira ves zbran naboj ter rezultat predstavi kot število dogodkov ki sprožijo nastanek določenega naboja (Slika 5.27). Pri večjem številu vpadnih fotonov se sproži več celic, zaradi česar je v spektru QDC več vrhov (Slika 5.28). Prav tako tudi pri višji napetosti dobimo večje število vrhov, saj je verjetnost za Geigerjevo razelektritev višja (Slika 5.29). Pulzi, ki se sprožijo po ali na koncu integracijskega časa, so le delno integrirani ter prispevajo k vrednostim med posameznimi vrhovi. [1].



Slika 5.27: QDC meritev neobsevane SiPM Hamamatsu 3050PE.



Slika 5.28: QDC meritev pri nizki (levo) ter visoki (desno) intenziteti vpadle svetlove [1].



Slika 5.29: QDC meritev pri nižji (levo) ter višji (desno)  $V_{\text{overvoltage}}$ . Meritve so opravljene pri isti intenziteti svetlobe [1].

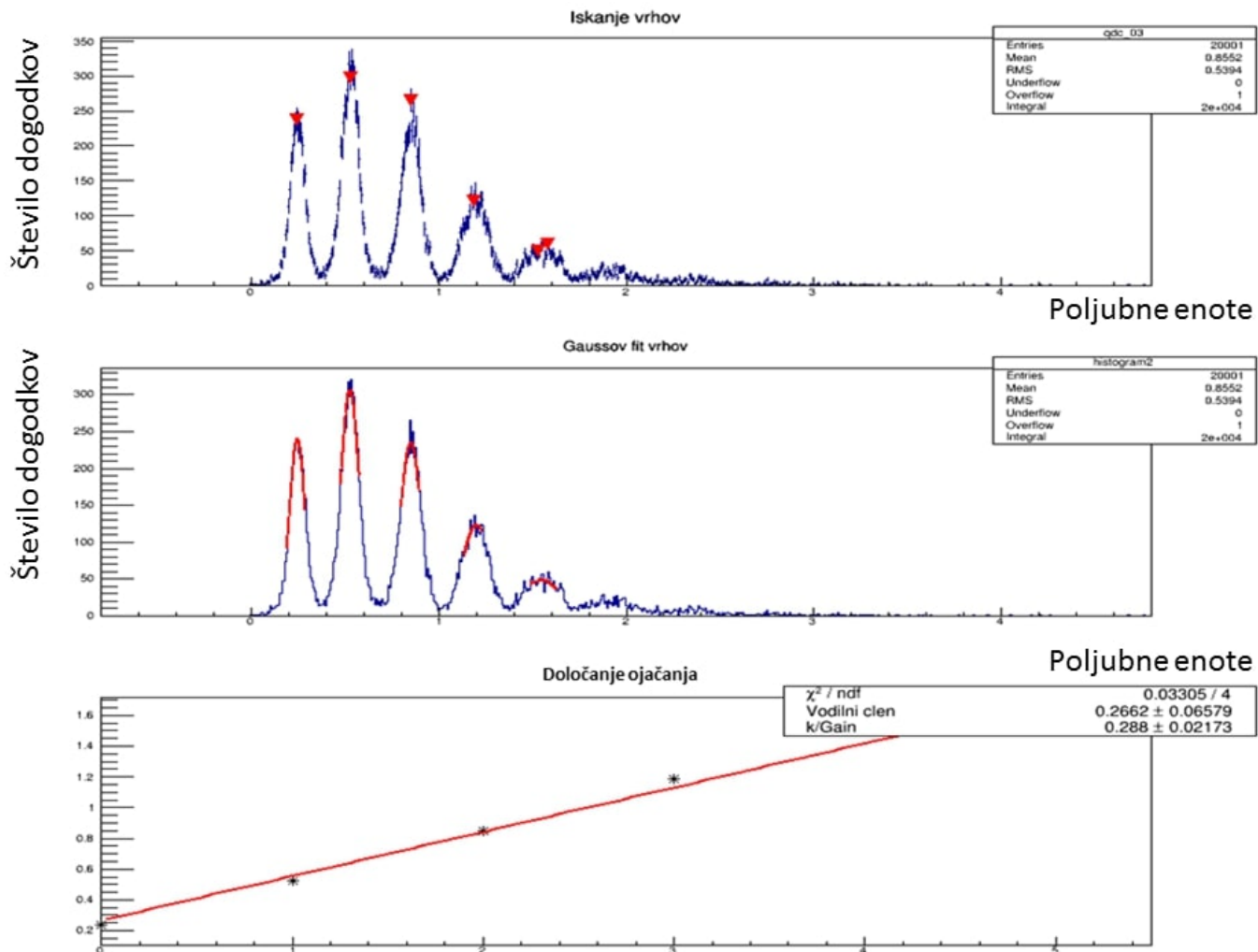
Posamezni vrhovi imajo v približku Gaussovo obliko. Širine vrhov so posledica dveh prispevkov. Kapacitivnosti posameznih celic SPAD se razlikujejo. Če bi vse kapacitivnosti bile enake, bi pričakovali, da vsaka celica SPAD shrani enako količino naboja ter so vrhovi v spektru QDC enako široki in med seboj enako oddaljeni. V realnosti pa to ni res, zato so vrhovi vse širši. Drug prispevek pa je zaradi statistične narave Geigerjeve razelektritve ter dušenja signala z upornikom. Posledično se v različnih celicah SPAD zbere različna količina naboja ter je napetost po zadužitvi signala zmeraj malce različna [1].

Iz razmika med posameznimi vrhovi je mogoče določiti ojačanje SiPM (Slika 5.30). Podatek o položajih posameznih vrhov, ki jih potrebujemo za določanje ojačenja SiPM, dobimo s prilagajanjem Gaussovih krivulj vrhovom [1].

Ojačanje ( $G$ ) določimo kot:

$$G = 1/e_0 \frac{\Delta Q}{\Delta n}, \quad (5.1)$$

kjer je  $n$  število proženih celic SPAD.

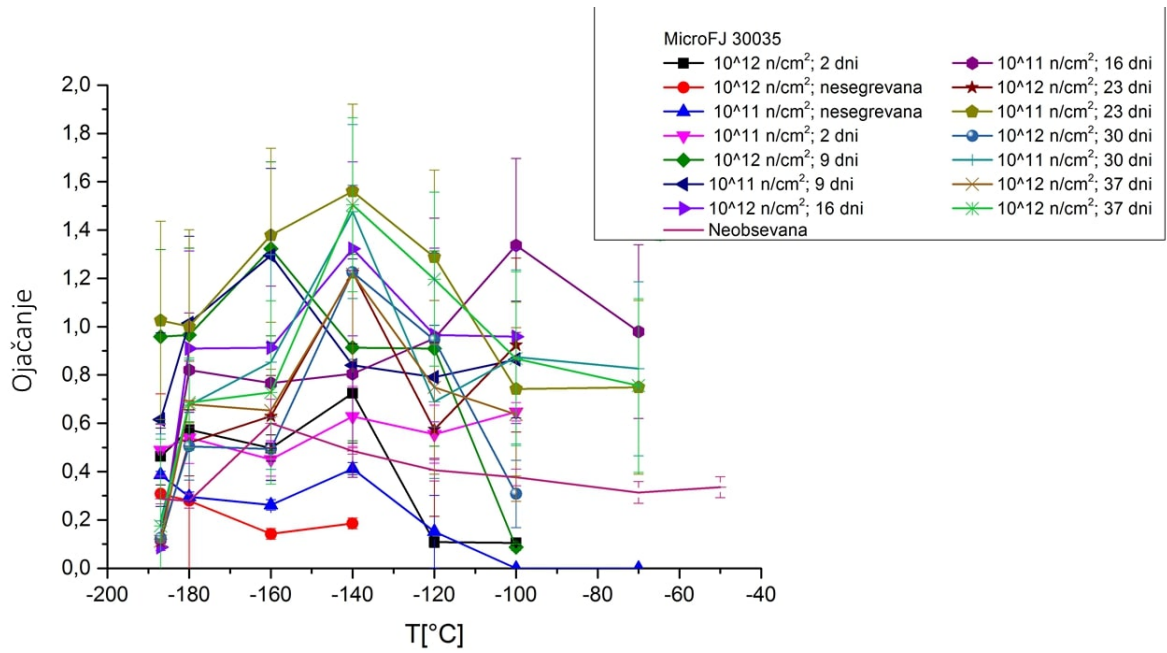


Slika 5.30: Določanje ojačenja SiPM iz QDC meritve neobsevane Hamamatsu 3050PE.

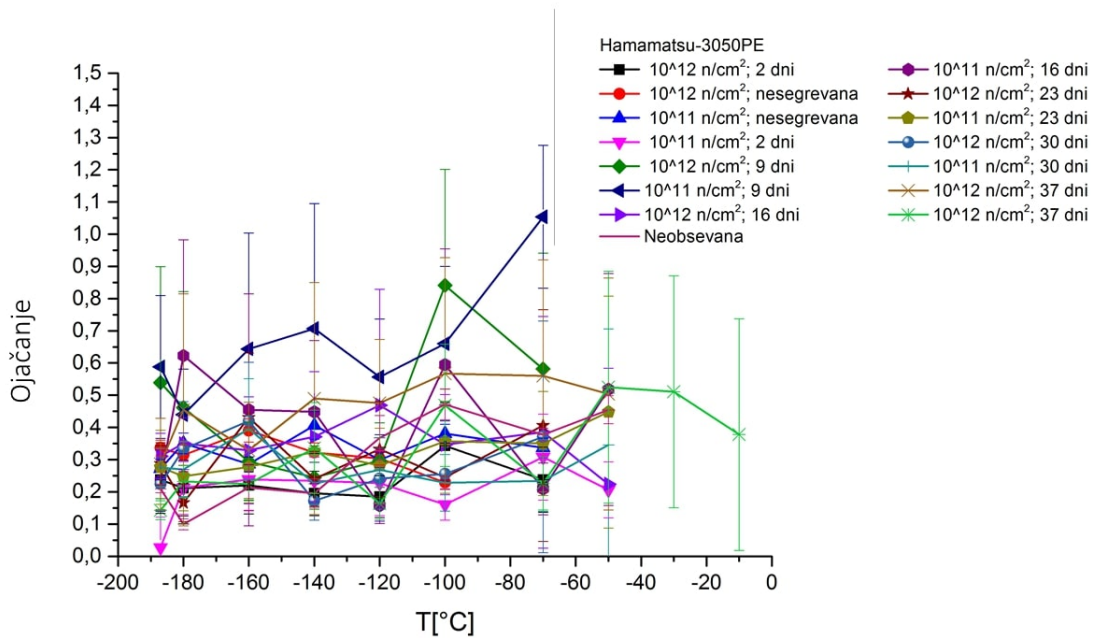
Po obsevanju ojačenja ni bilo mogoče določiti razen pri najnižji temperaturi, saj pri višjih temperaturah ni bilo mogoče določiti spektra QDC zaradi nerazvidnosti signalov proženja različnega števila celic SPAD. Po vsakem tednu obsevanja je bilo mogoče določiti ojačenje pri višji temperaturi, vendar tudi po petih tednih segrevanja, ojačenja ni bilo mogoče določiti pri temperaturi višji od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



### 5.3. Meritev ojačenja SiPM



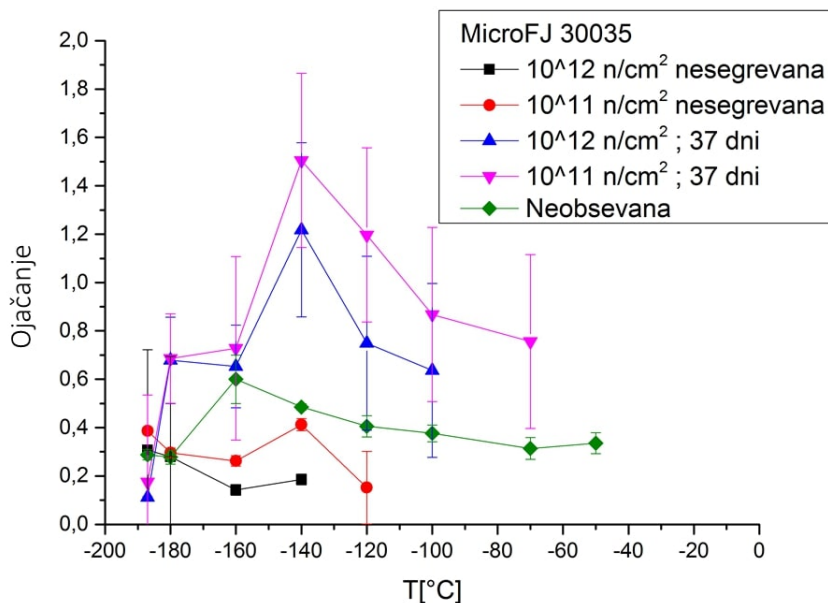
Slika 5.31: Ojačanje neobsevane MicroFJ-30035 ter obeh obsevanih pred in po posameznih tednih segrevanja.



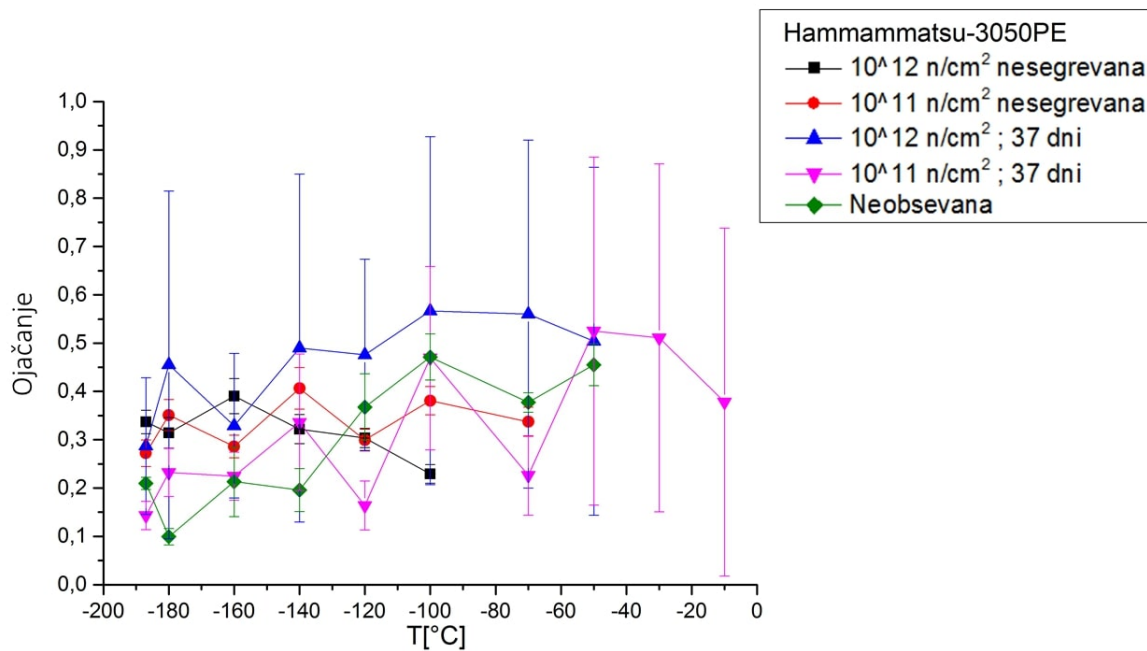
Slika 5.32: Ojačanje neobsevane Hamamatsu 3050PE ter obeh obsevanih pred in po posameznih tednih segrevanja.

## Poglavje 5. Rezultati

Za večjo nazornost pokažimo še primerjavo ojačenja neobsevane ter obeh obsevanih SiPM pred in po petih tednih segrevanja.



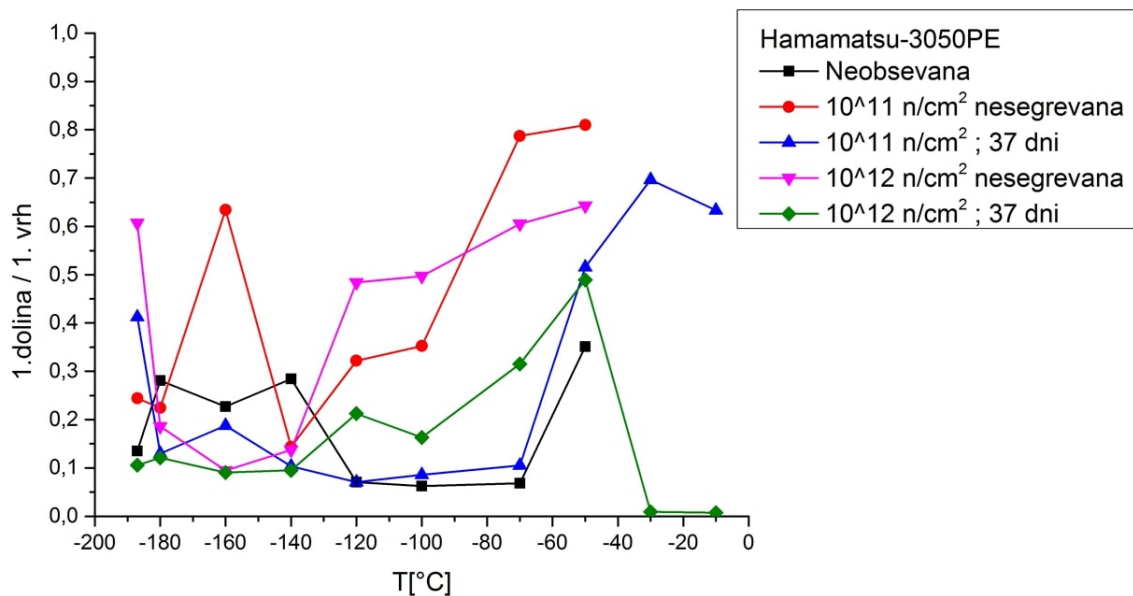
Slika 5.33: Ojačanje neobsevane MicroFJ-30035 ter obeh obsevanih pred in po koncu segrevanja.



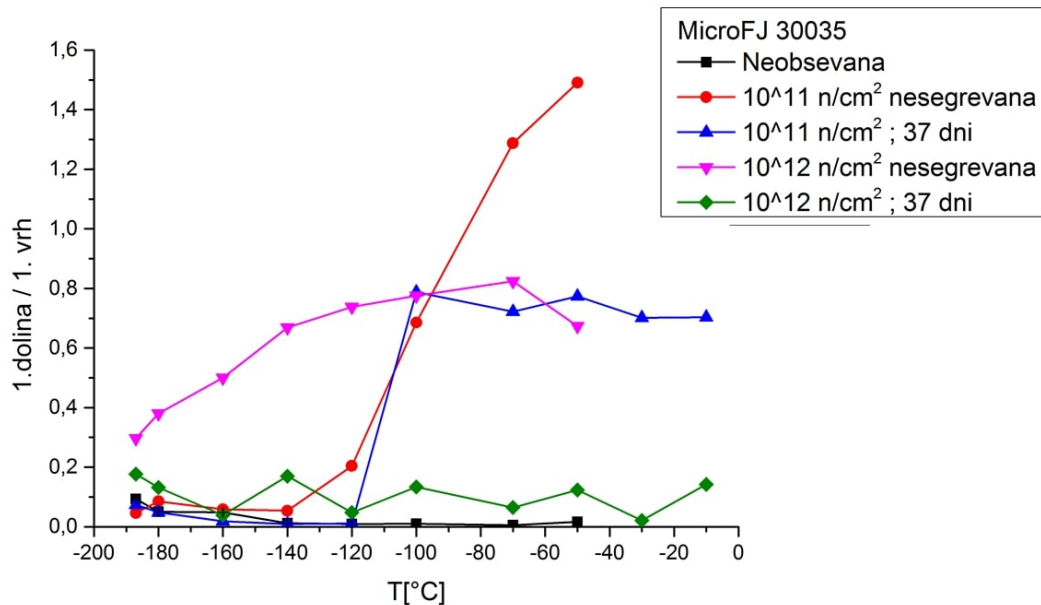
Slika 5.34: Ojačanje neobsevane Hamamatsu 3050PE ter obeh obsevanih pred in po koncu segrevanja.

Vidimo, da se v primeru Hamamatsu 3050PE v okviru merskih napak ojačanje ne spreminja. V primeru MicroFJ-30035 pa ojačanje po obsevanju pade pod vrednost ojačenja neobsevane celice, in sicer za celico obsevano s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  pade bolj kot za celico obsevano s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . Po petih tednih segrevanja pa ojačanje naraste nad vrednost neobsevane celice. Za celico obsevano s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  naraste manj kot za celico obsevano s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Zanimiva je tudi primerjava velikosti vrednosti QDC meritve med vrhovi ter velikosti vrhov. K vrednostim med vrhovi namreč prispevajo signali, ki so nastali po ali na koncu integracijskega časa. Glavni prispevki so zaradi zakasnenih signalov ter zaradi temnega šuma.

Primerjali smo velikost doline med prvim in drugim vrhom ter velikost prvega vrha v QDC meritvah.



Slika 5.35: Primerjava velikosti prve doline proti prvemu vrhu QDC meritve Hamamatsu 3050PE.



Slika 5.36: Primerjava velikosti prve doline proti prvemu vrhu QDC meritve MicroFJ-30035.

Tako v primeru MicroFJ-30035 kot Hamamatsu 3050PE, se zaradi povečanega temnega šuma velikost prve doline glede na velikost prvega vrha v QDC meritvi po obsevanju poveča. Po petih tednih segrevanja se razmerje velikosti prve doline ter prvega vrha ponovno zmanjša proti vrednostim pred obsevanjem. Prav tako razmerje narašča z temperaturo, saj temni šum prav tako narašča z višanjem temperature.

# Poglavje 6

## Zaključek

V magistrskem delu smo preučevali vpliv segrevanja silicijevih fotopomnoževalk na njihovo okrevanje po obsevanju z nevtroni. Obsevali smo detektorje 3050PE proizvajalca Hamamatsu ter MicroFJ-30035 proizvajalca ON Semiconductor. Vse celice so bile kvadratne s stranico  $3\text{mm}$ . Imeli smo 5 enakih detektorjev vsakega proizvajalca, od katerih so bile tri neobsevane, ena obsevana s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  ter druga s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

Za vsako celico smo opravili meritve  $I(V)$  karakteristike iz katere smo izluščili podatek o vrednosti pragovne napetosti. Izmerili smo tudi oblike signala pri različnih  $V_{overvoltage}$  ter različnih temperaturah. Najnižja temperatura, pri kateri smo opravljali meritve, je znašala  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$ , dosegli smo jo tako, da smo celico v izolirani posodi potopili v posodo s tekočim dušikom. Meritve pri višjih temperaturah smo opravili tako, da smo s pomočjo uporabnih grelcev zvišali temperaturo do želene vrednosti.

Obsevane celice utrpijo sevalne poškodbe, ki vplivajo na njihovo delovanje. Med drugim se pri obsevanju z nevtroni spremeni pragovna napetost in sicer ta raste linearno z višanjem fluence [21]. Vendar tega pri naših meritvah nismo opazili, saj smo silicijeve fotopomnoževalke obsevali s prenizkimi fluencami. Sevalne poškodbe so vplivale tudi na povišanje šuma, kar je bilo opazno pri zajemu signala. Medtem ko so pri neobsevani celici bili opazni signali posameznih celic, teh pri obsevanih celicah ni bilo mogoče razbrati.

Obsevane celice smo nato segrevali pet zaporednih tednov pri temperaturi  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Po vsakem tednu smo ponovno opravili meritve  $I(V)$  karakteristike ter oblike signala pri različnih  $V_{overvoltage}$ . Med segrevanjem ter meritvami so bile celice shranjene v zamrzovalni skrinji, saj se nekatere sevalne poškodbe začnejo odpravljati že pri sobni temperaturi.

Opazili smo, da se po vsakem tednu segrevanja temperatura, pri kateri so pri zajemu signala razpoznavni prispevki posameznih celic, viša. In sicer je pri detektorjih, obsevanih s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , ta višja kot pri detektorjih, obsevanih s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . Po enakem času segrevanja so silicijeve fotopomnoževalke proizvajalca Hamamatsu kazale boljše okrevanje kot MicroFJ-30035, saj pri temperaturi, kjer so pri Hamamatsu 3050PE prispevki posameznih celic že bili razpoznavni, teh pri MicroFJ-30035 še ni bilo mogoče razpoznati.

Iz zajema signala smo določili spekter QDC s pomočjo katerega smo lahko določili ojačanje silicijevih fotopomnoževalk. Izkaže se, da se v primeru detektorja Hamamatsu 3050PE, ojačanje ne spremeni zaradi izpostavljenosti sevanju, saj je v okviru

merskih napak ostalo enako tako za neobsevane kot obsevane celice pred in po segrevanju. V primeru MicroFJ-30035 pa je ojačanje po obsevanju manjše kot pred obsevanjem. Po petih tednih segrevanja pa vrednost ojačenja naraste nad vrednost pred obsevanjem.

Iz spektra QDC smo narisali tudi graf odvisnosti razmerja velikosti prve doline ter prvega vrha od temperature. V primeru obeh merjenih SiPM vrednost razmerja po obsevanju naraste ter se po petih tednih obsevanja ponovno zniža. Prav tako vrednost razmerja narašča s temperaturo.

V nadaljnjem delu bomo meritve opravili še na preostalih detektorjih. Prav tako bi bilo mogoče določiti spremembo kapacitivnosti, karakterističnega časa ter upornosti detektorjev po obsevanju ter vpliv segrevanja na odpravo teh sprememb. Prav tako bi lahko izmerili tudi temni tok ter celice obsevali še z višjimi vrednostmi fluenc.

# Literatura

- [1] M. S. Nitschke, *Characterization of Silicon Photomultipliers Before and After Neutron Irradiation*, Doktorsko delo (2016).
- [2] C. ATLAS Experiment, *About the ATLAS Experiment* (2020), dosegljivo na: <https://atlas.cern/discover/about>, [ogled 5. 8. 2020].
- [3] *Relative importance of the three principal interactions of photons in matter* (2012), dosegljivo na: <http://www.ilocis.org/documents/chpt48e.htm>,  
ogled 23. 3. 2020
- [4] H. Sadrozinski, *Applications of silicon detectors*, IEEE Transactions on Nuclear Science **48**, 933 (2001).
- [5] *de Broglie Wavelength and Frequency of Scattered Electrons in the Compton Effect* (2013), dosegljivo na: [https://www.researchgate.net/publication/236737231\\_de\\_Broglie\\_Wavelength\\_and\\_Frequency\\_of\\_Scattered\\_Electrons\\_in\\_the\\_Compton\\_Effect](https://www.researchgate.net/publication/236737231_de_Broglie_Wavelength_and_Frequency_of_Scattered_Electrons_in_the_Compton_Effect), [ogled 25. 3. 2020].
- [6] *Electronic band structure* (2017), dosegljivo na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic\\_band\\_structure/media/File:Solid\\_state\\_electronic\\_band\\_structure.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_band_structure/media/File:Solid_state_electronic_band_structure.svg), [ogled 25. 3. 2020].
- [7] *Illustration of the electron hole conduction* (2013), dosegljivo na: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hole\\_conduction\\_01.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hole_conduction_01.png),  
ogled 26.3.2020
- [8] *I/V graph of a semiconductor diode* (2015), dosegljivo na: <https://www.miniphysics.com/iv-graph-of-semiconductor-diode.html>,  
ogled 30. 3. 2020
- [9] P. Slawomir Piatek, *Physics and operation of the MPPC silicon photomultiplier* (2014), dosegljivo na: <https://hub.hamamatsu.com/eu/en/technical-note/sipm-physics-operation/index.html>, [ogled 5. 7. 2020].
- [10] N. Dinu, A. Nagai in A. Para, *Breakdown voltage and triggering probability of SiPM from IV curves at different temperatures*, Nucl. Instrum. Meth. A **845**, 64 (2017).

- [11] C. Piemonte, A. Ferri, A. Gola, N. Serra, A. Tarolli in N. Zorzi, *Performance of a novel, small-cell, high-fill-factor SiPM for TOF-PET*, v *2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)* (2013) str. 1–3.
- [12] C. Jendrysik, *Silicon Photomultiplier - Concepts, Characteristics, Prospects - konferenca, Lake Starnberg, Nemčija, 16.-20. september 2013*, PoS **Vertex2013**, 043 (2013).
- [13] I. Rech, A. Ingargiola, R. Spinelli, I. Labanca, S. Marangoni, M. Ghioni in S. Cova, *Optical crosstalk in single photon avalanche diode arrays: a new complete model*. *Opt. Express* **16**, 8381-8394, *Optics express* **16**, 8381 (2008).
- [14] E. Garutti in Y. Musienko, *Radiation damage of SiPMs*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **926**, 69 (2019), silicon Photomultipliers: Technology, Characterisation and Applications.
- [15] J. R. Srour in J. W. Palko, *Displacement Damage Effects in Irradiated Semiconductor Devices*, *IEEE Transactions on Nuclear Science* **60**, 1740 (2013).
- [16] E. G. in Yu. Musienko, *Radiation damage of SiPMs*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **926**, 69 (2019), silicon Photomultipliers: Technology, Characterisation and Applications.
- [17] *Semiconductor radiation detectors - device physics* (Springer Verlag Berlin/Hiedelberg, year = 2007, author = Gerhard Lutz,).
- [18] T. Matsubara, H. Tanaka, K. Nitta in M. Kuze, *Radiation damage of MPPC by gamma-ray irradiation with Co-60*, PoS **PD07**, 032 (2006).
- [19] R. P. et al. S. Libertino., *Radiation hardness of silicon photomultipliers under 60 Co -ray irradiation*, *Nucl. Instrum. Meth* **A767**, 347–352 (2014).
- [20] M. C. Vignali, V. Chmill, E. Garutti, R. Klanner, M. Nitschke, J. Schwandt in S. Sonder, *Neutron induced radiation damage of KETEK SiPMs*, v *2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD)* (2016) str. 1–5.
- [21] *Characterisation of radiation-damaged sipms* (2018), dosegljivo na: <http://www.icasipm.physics.gatech.edu/>, [ogled 25. 3. 2019].
- [22] T. Tsang, T. Rao, S. Stoll in C. Woody, *Neutron radiation damage and recovery studies of SiPMs*, *Journal of Instrumentation* **11** (12), P12002.
- [23] I. Nakamura, *Radiation damage of pixelated photon detector by neutron irradiation*, Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment - NUCL INSTRUM METH PHYS RES A **610**, 110 (2009).



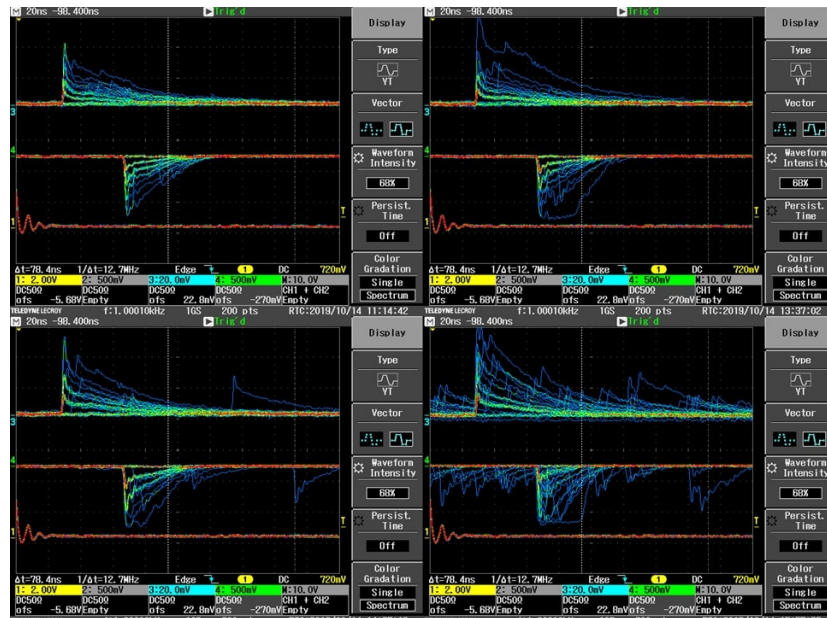
- 
- [24] T. Tsang, T. Rao, S. Stoll in C. Woody, *Neutron radiation damage and recovery studies of SiPMs*, Journal of Instrumentation **11** (12), P12002.
- [25] Y. Musienko in A. Karneyeu, *Investigation of avalanche photodiodes after irradiation with neutrons up to  $5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$* , PoS **PhotoDet2015**, 073 (2016).
- [26] *The CMS electromagnetic calorimeter project: Technical Design Report*, Technical Design Report CMS (CERN, Geneva, 1997).
- [27] sensL, *MPPCs for precision measurement* (2017), dosegljivo na: <http://sensl.com/downloads/ds/DS-MicroJseries.pdf>, [ogled 20. 8. 2020].
- [28] H. Photonics, *High PDE and Timing Resolution SiPM Sensors in a TSV Package* (2016), dosegljivo na: [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360\\_series\\_-\\_kapd1052e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_-_kapd1052e.pdf), [ogled 20. 8. 2020].
- [29] S. Piatek, *How does temperature affect the performance of an SiPM?* (2017), dosegljivo na: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-note/sipm-temperature-performance/index.html>, [ogled 10. 6. 2020].



# Dodatek A

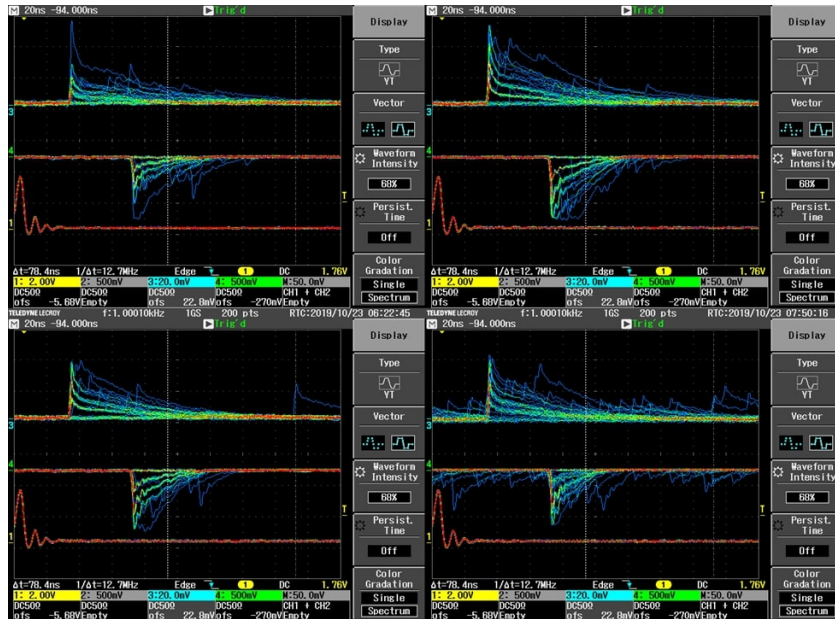
## Vse meritve oblike signala

V poglavju 5.2 smo predstavili samo meritve neobsevanih celic, celic pred segrevanjem ter celic po petih tednih segrevanja. Na tem mestu so zbrane vse preostale meritve oblike signala.

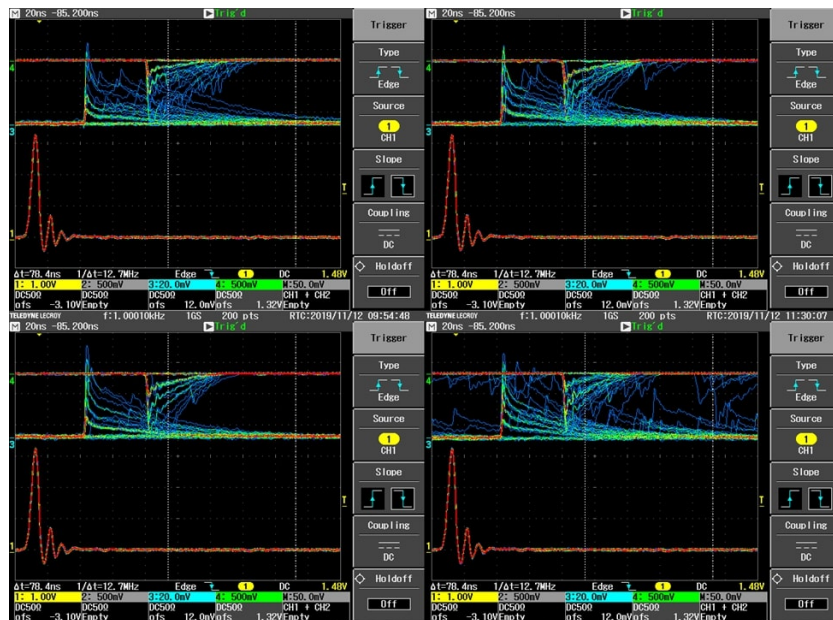


Slika A.1: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 1 tednu segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

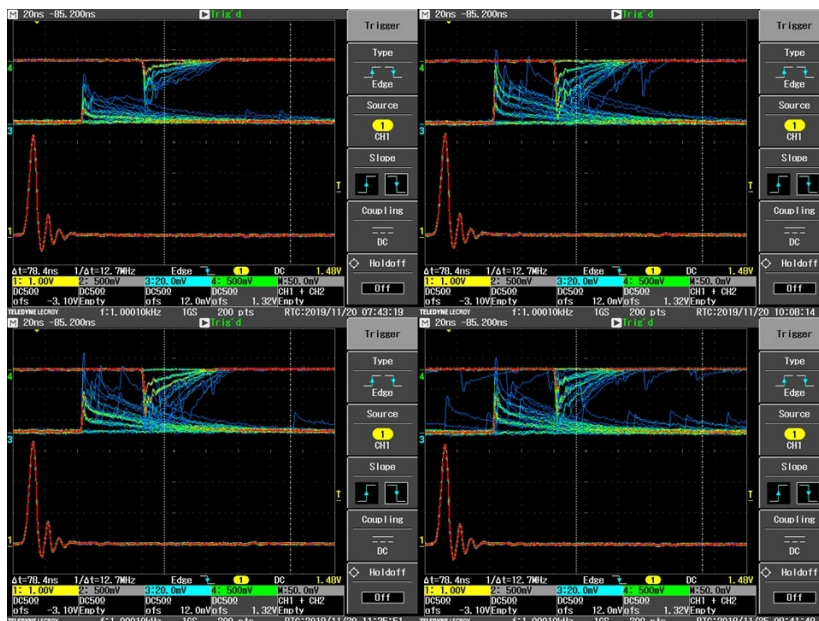
## Dodatek A. Vse meritve oblike signala



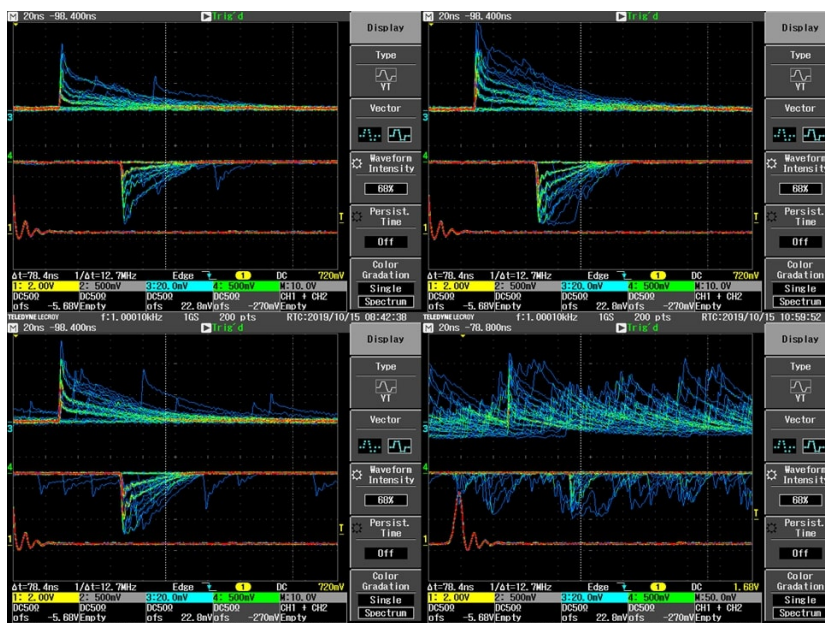
Slika A.2: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 2 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{\text{overvoltage}} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



Slika A.3: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 3 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{\text{overvoltage}} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

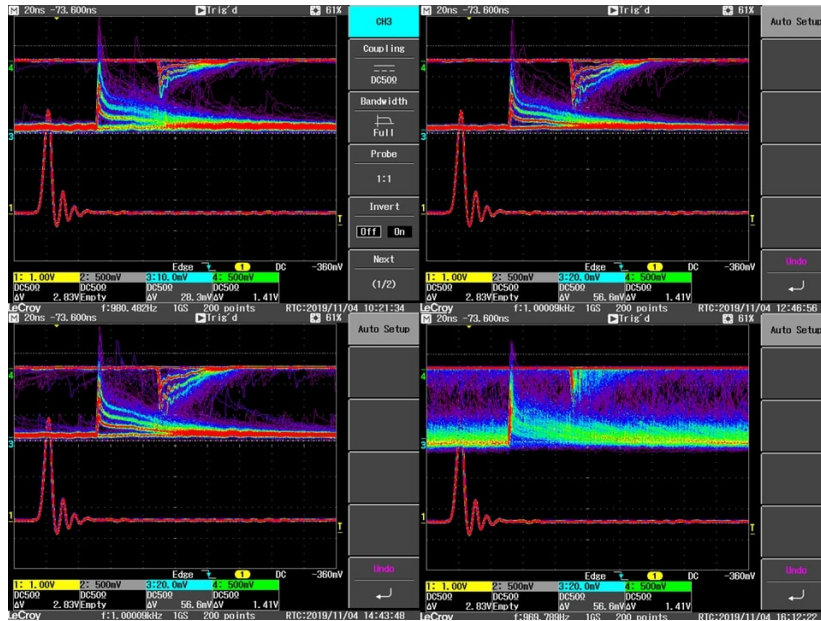


Slika A.4: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 4 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ \text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ \text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ \text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ \text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

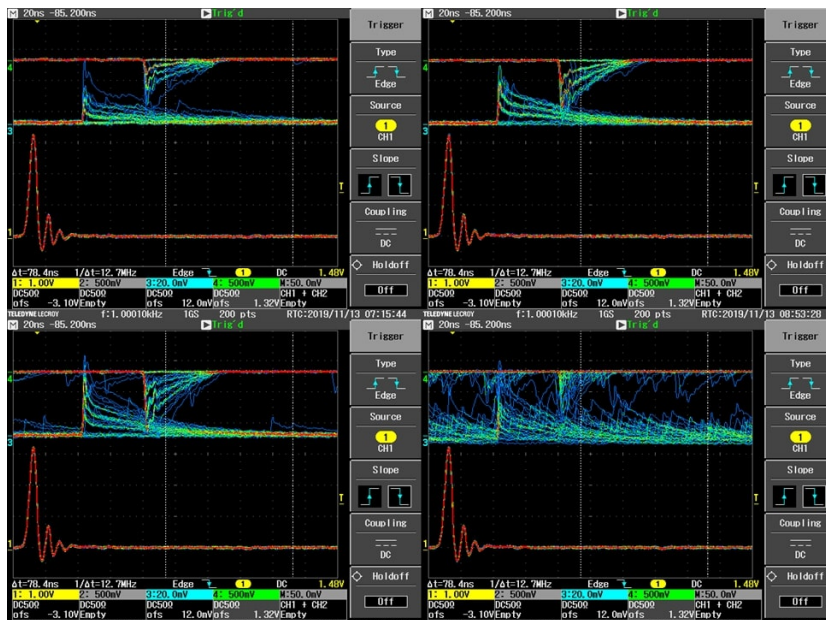


Slika A.5: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 1 tednu segrevanjapo, pri temperaturi  $-187^\circ \text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ \text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ \text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ \text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

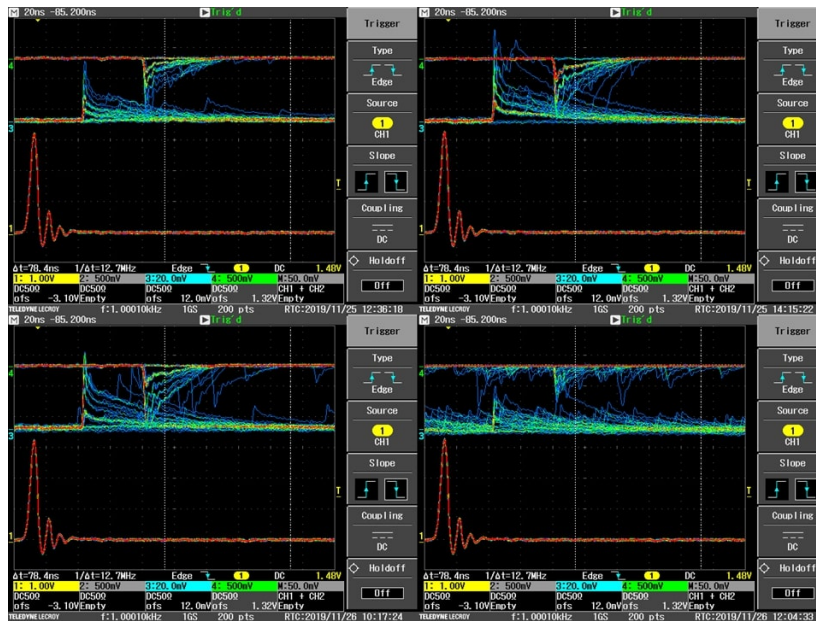
## Dodatek A. Vse meritve oblike signala



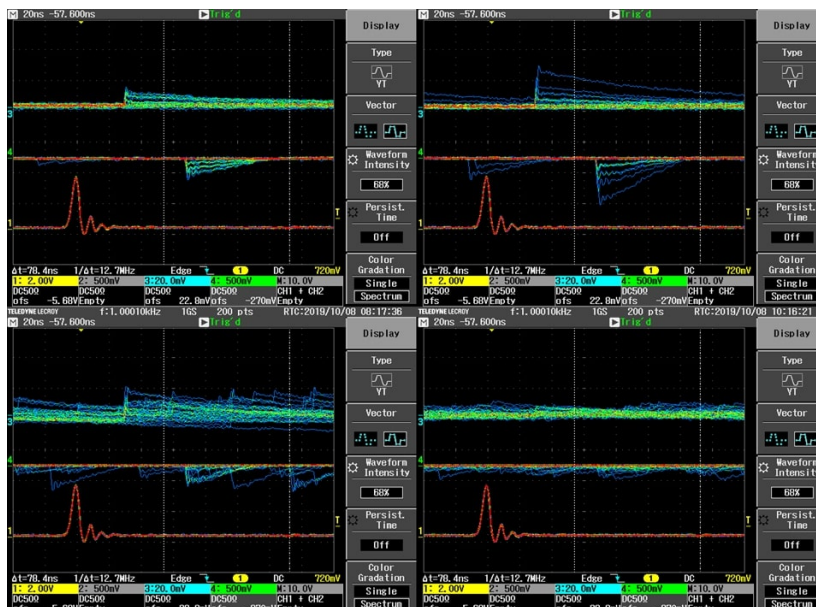
Slika A.6: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 2 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{\text{overvoltage}} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



Slika A.7: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 3 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{\text{overvoltage}} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

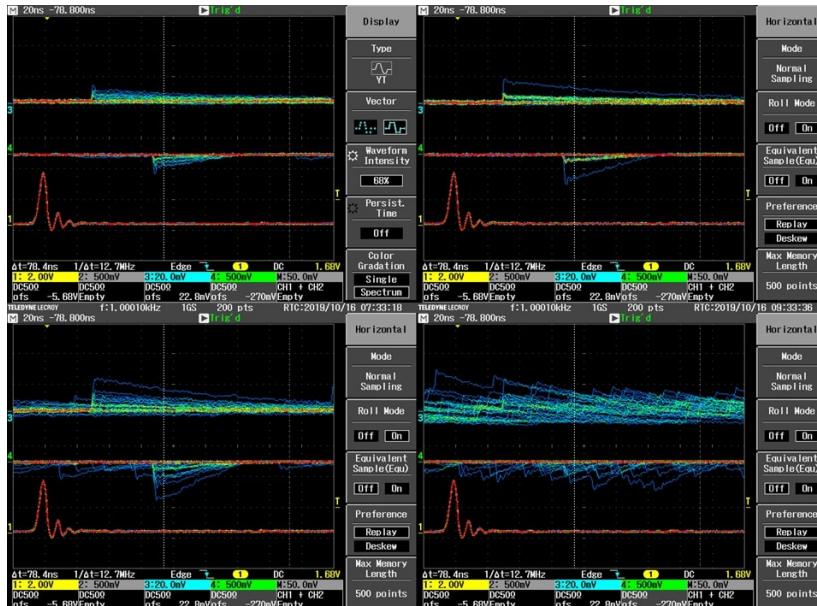


Slika A.8: Signal Hamamatsu 3050PE obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 4 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

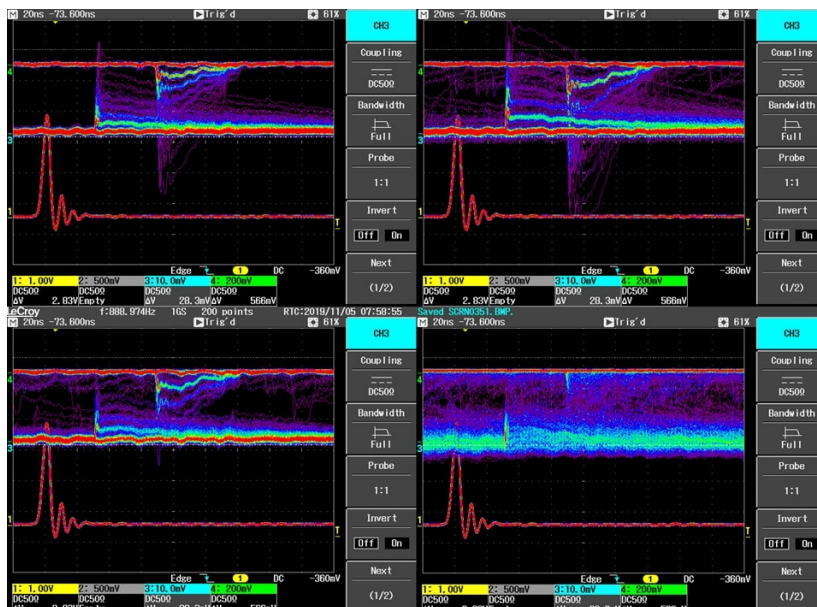


Slika A.9: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 1 tednu segrevanja, pri temperaturi  $-187 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140 \text{ }^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

## Dodatek A. Vse meritve oblike signala

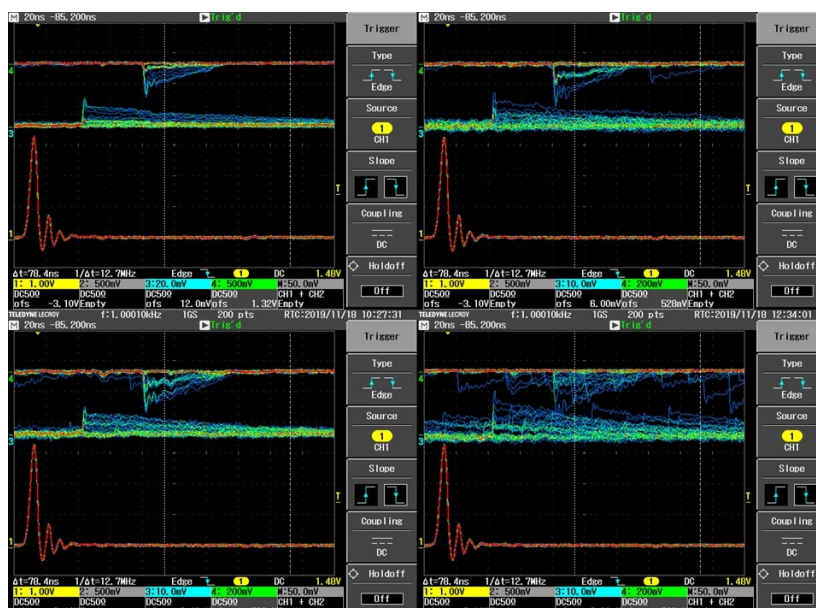


Slika A.10: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 2 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

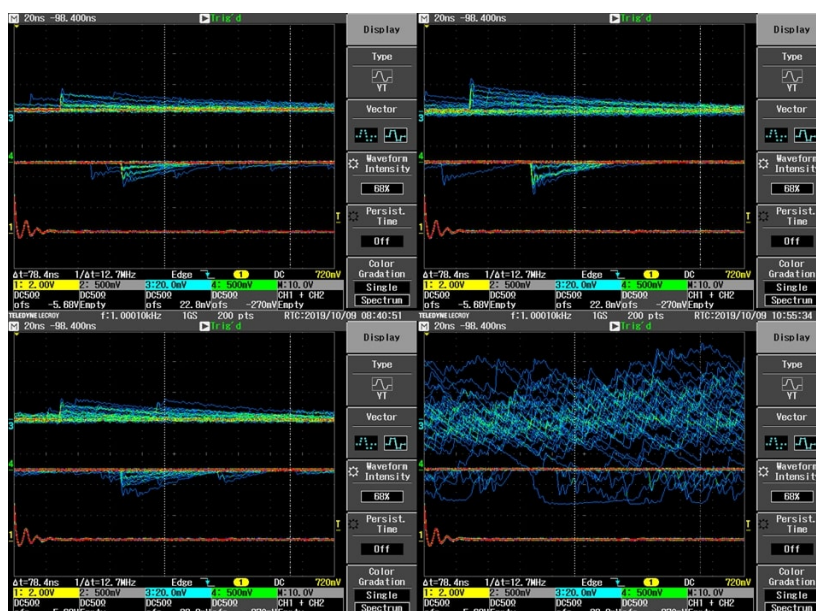


Slika A.11: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 3 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



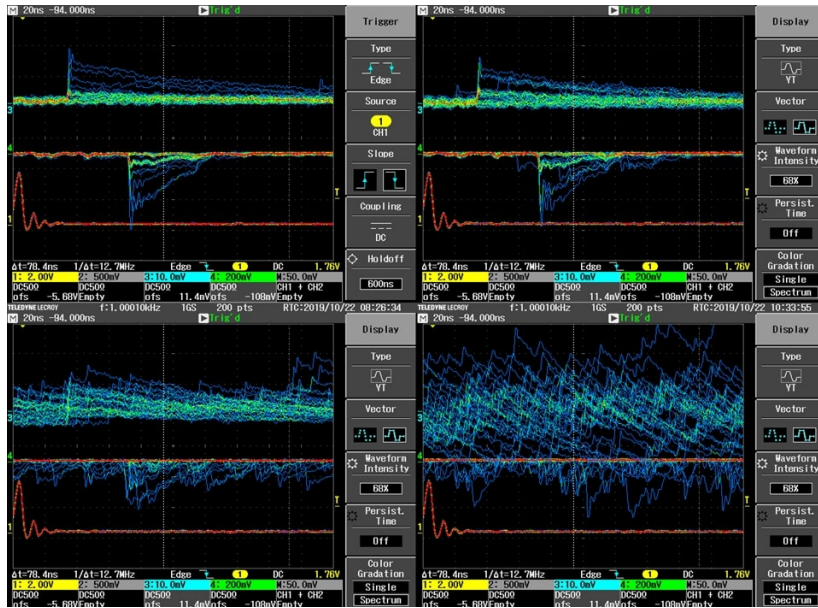


Slika A.12: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  po 4 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

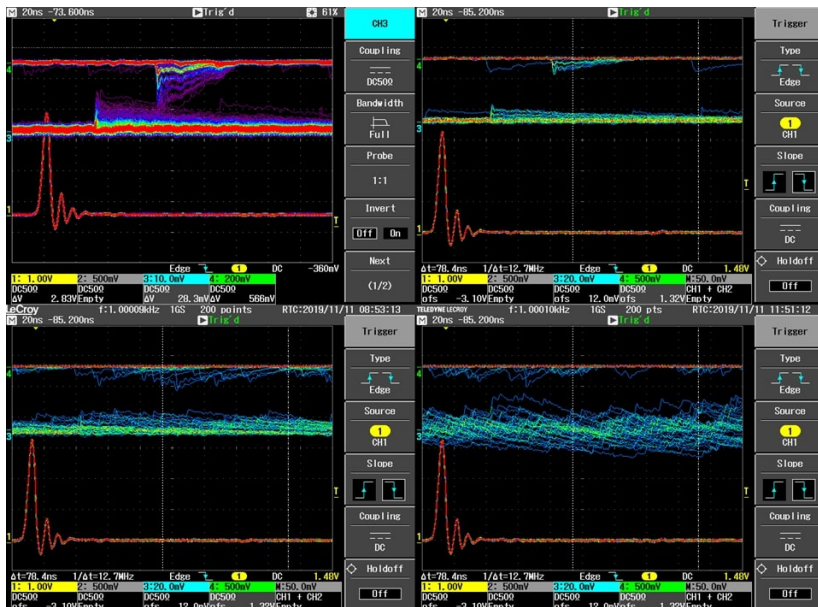


Slika A.13: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 1 tednu segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

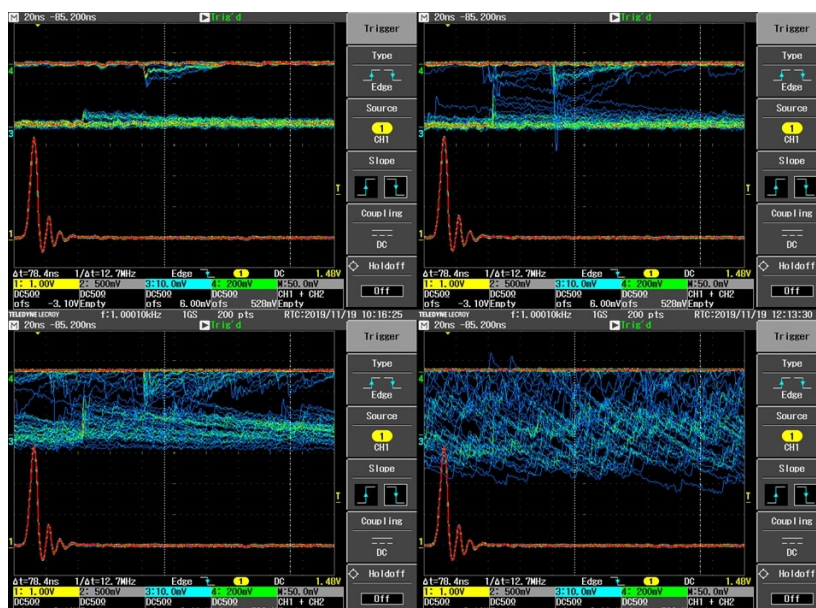
## Dodatek A. Vse meritve oblike signala



Slika A.14: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 2 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



Slika A.15: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 3 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.



Slika A.16: Signal MicroFJ-30035 obsevane s fluenco  $\Phi_{eq} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  po 4 tednih segrevanja, pri temperaturi  $-187^\circ\text{C}$  (zgoraj levo),  $-140^\circ\text{C}$  (zgoraj desno),  $-100^\circ\text{C}$  (spodaj levo) ter  $-50^\circ\text{C}$  (spodaj desno). Signal je bil zajet pri  $V_{overvoltage} = +4 \text{ V}$ . Kanal 1 je signal iz laserja, 3 je signal pred ojačevalnikom, 4 pa signal po ojačevalniku.

