

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO  
ODDELEK ZA FIZIKO

Naravoslovna smer

DIPLOMSKO DELO

**Detekcija posameznih fotonov  
s silicijevo fotopomnoževalko**

Rok Dolenec

MENTOR: doc. dr. Samo Korpar

Ljubljana, 2007



Zahvaljujem se prof. dr. Petru Križanu, ki me je navdušil nad delom na Odseku za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev Instituta Jožef Stefan in veliko pripomogel k nastanku tega dela. Še posebej se moram zahvaliti mentorju doc. dr. Samu Korparju za vse znanje in izkušnje ki mi jih je posređoval pri delu, pomoč, ko se mi je kaj ustavilo in čas ter vodstvo pri pisanju diplomskega dela. Zahvaliti se moram še dr. Roku Pestotniku za vso pomoč in nasvete.

Prav tako sem zelo hvaležen staršem za potrpežljivost in podporo med študijem.



## Povzetek

Za identifikacijo nabitih delcev se v eksperimentalni fiziki osnovnih delcev pogosto uporablja detektor obročev Čerenkova, v katerem potrebujemo prostorsko občutljiv detektor svetlobe, ki je sposoben zaznati posamezne fotone. Do sedaj so se najpogosteje uporabljale večžične proporcionalne komore in fotopomnoževalke, pred kratkim pa se je pojavil nov tip polprevodniškega detektorja svetlobe, silicijeva fotopomnoževalka. Glavne prednosti silicijeve fotopomnoževalke pred običajnimi fotopomnoževalkami so neobčutljivost na magnetno polje, kompaktnost in boljši izkoristek za detekcijo fotonov, za delovanje pa ne potrebujejo visoke napetosti. Pomanjkljivost silicijeve fotopomnoževalke je visok temni šum pogostosti 1 MHz, ki ga povzročajo termično vzbujeni nosilci naboja. Ker ima silicijeva fotopomnoževalka tudi zelo dobro časovno ločljivost, bi lahko problem temnega šuma zmanjšali, če bi se pri meritvah omejili na zelo ozko časovno okno. V diplomskem delu sem raziskal možnost uporabe silicijeve fotopomnoževalke za detekcijo fotonov v detektorju obročev Čerenkova pri načrtovani nadgradnji spektrometra Belle.

Ključne besede: silicijeva fotopomnoževalka, detektor obročev Čerenkova, Belle

## Abstract

An important part of charged particle identification is the ring imaging Cherenkov counter in which position sensitive light detectors capable of detecting single photons are used. So far the most common detectors used were multiwire proportional chambers and photomultiplier tubes. Recently a new silicon photodetector, the silicon photomultiplier became available. Its main advantages over the photomultiplier tubes are insensitivity to high magnetic fields, compactness, better sensitivity to light and operation at low voltages. Silicon photomultipliers main drawback is its high dark noise rate (typically around 1 MHz), originating mainly from the carriers generated thermally in sensitive volume. Because of silicon photomultiplier's excellent time resolution the measurements can be limited to a very short time window which would decrease the dark noise background to a tolerable level. In this work I present the possibility of using the silicon photomultiplier as a photon detector in planned ring imaging Cherenkov counter upgrade for the Belle spectrometer.

Keywords: silicon photomultiplier, ring imaging Cherenkov counter, Belle



## Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Nadgradnja spektrometra Belle</b>	<b>5</b>
2.1	Spektrometer Belle . . . . .	5
2.2	Detektorji Čerenkova . . . . .	6
2.3	Nadgradnja spektrometra Belle . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Silicijeva fotopomnoževalka</b>	<b>11</b>
3.1	Polprevodniški detektorji svetlobe . . . . .	11
3.2	Silicijeva fotopomnoževalka . . . . .	12
3.2.1	Zgradba . . . . .	12
3.2.2	Signali . . . . .	13
3.2.3	Občutljivost na svetlobo . . . . .	13
3.2.4	Temni šum . . . . .	15
3.2.5	Druge lastnosti . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Meritve lastnosti silicijevih fotopomnoževalk</b>	<b>17</b>
4.1	Postavitev poskusa . . . . .	18
4.2	Rezultati . . . . .	19
4.2.1	Ojačanje in delovne napetosti . . . . .	19
4.2.2	Temni šum . . . . .	20
4.2.3	Porazdelitev naboja . . . . .	23
4.2.4	Časovna porazdelitev sunkov . . . . .	26
4.2.5	Površinska občutljivost . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Svetlobni vodniki</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Zaključek</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>Literatura</b>	<b>49</b>





# 1 Uvod

Tipični eksperimenti v fiziki osnovnih delcev izgledajo tako, da v pospeševalniku delcev na neki točki trkamo delce z visokimi energijami. Okrog te točke je zgrajen spektrometer, s katerim želimo zaznati in določiti delce, ki nastanejo pri teh trkih. Različni deli spektrometra izmerijo poti, gibalne količine, energije in hitrosti delcev, ki nam skupaj povejo dovolj o delcu, da ga lahko določimo. Za identifikacijo delcev z gibalnimi količinami v območju od 1 GeV/c do 50 GeV/c dobro delujejo detektorji obročev Čerenkova, katerih sestavni del je zelo občutljiv detektor svetlobe, ki mora biti sposoben zaznati tudi posamezne fotone. V ta namen so do sedaj uporabljali detektorje svetlobe, kot so večžična proporcionalna komora, fotopomnoževalka ali hibridna fotodioda.

Pred nekaj leti se je začel razvoj novega tipa polprevodniškega detektorja svetlobe, silicijeve fotopomnoževalke, ki je resni kandidat za zaznavanje svetlobe v detektorjih obročev Čerenkova. Silicijeva fotopomnoževalka je sestavljena iz mreže plazovnih fotodiod (pikslov) na skupnem kristalu silicija, ki delujejo v omejenem Geigerjevem načinu in so povezane na skupni upor. Vsak piksel lahko zazna posamezne fotone, signal iz silicijeve fotopomnoževalke pa je vsota signalov iz vseh pikslov. Silicijeva fotopomnoževalka je torej zelo občutljiv detektor svetlobe, s katerim lahko zaznamo posamezne fotone, hkrati pa tudi merimo intenziteto vpadne svetlobe.

Silicijeve fotopomnoževalke imajo pred drugimi detektorji svetlobe precej prednosti: so bolj kompaktne, manj občutljive na poškodbe, delujejo pri nizkih napetostih in niso občutljive na zunanja magnetna polja, kot kaže pa bodo tudi cenejše. Največji omejitvi silicijevih fotopomnoževalk pa sta majhna aktivna površina in temni šum (signali ki jih sprožijo termično vzbujeni nosilci naboja), ki omejuje detekcijo posameznih fotonov pri sobni temperaturi.

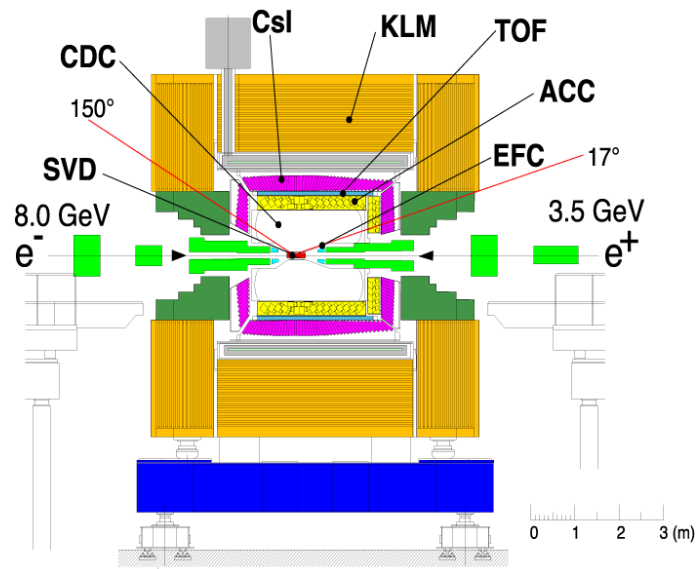
V tem diplomskem delu bom opisal silicijeve fotopomnoževalke in možnosti njihove uporabe v detektorjih obročev Čerenkova. Predstavil bom meritve lastnosti silicijevih fotopomnoževalk pri osvetlitvi z zelo šibko svetlobo (nekaj fotonov), ki sem jih opravil, da bi jih preizkusili kot potencialne detektorje svetlobe za detektor obročev Čerenkova spektrometra Belle. Na koncu bom predstavil še možnost efektivnega povečanja aktivne površine silicijevih fotopomnoževalk z zbiranjem svetlobe s svetlobnimi vodniki.



## 2 Nadgradnja spektrometra Belle

### 2.1 Spektrometer Belle

Spektrometer Belle je bil zgrajen za proučevanje redkih razpadnih kanalov mezonov  $B$ , ki so pomembni za proučevanje kršitve simetrije CP. Spektrometer Belle meri razpadne produkte asimetričnih trkov elektronov z energijo 8.0 GeV in pozitronov z energijo 3.5 GeV v pospeševalniku delcev KEK-B. Pri trkih nastane kratkoživa resonanca  $\Upsilon(4S)$ , katere energija je ravno nad pragom za nastanek para mezonov  $B$  ( $B^0\bar{B}^0$  ali  $B^+B^-$ ). Ker je trk asimetričen se nastala mezona gibljeta v smeri žarka elektronov in v povprečju pred razpadom prepotujeta  $150\ \mu\text{m}$ . Zato je zelo pomembna dobra prostorska ločljivost detektorja blizu točke interakcije, da lahko določijo, iz katerega od para mezonov  $B$  so nastali nadaljnji razpadni produkti. Najpomembnejši razpadi so  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ ,  $K^+\pi^-$  in  $B^+ \rightarrow \bar{D}^0K^+$ , zato je pomembno, da spektrometer čim bolje loči pione od kaonov.



Slika 1: Shematski prerez spektrometra Belle [1].

Spektrometer Belle je zgrajen okrog interakcijske točke (presečišča žarkov  $e^-$  in  $e^+$ ). Glavne komponente so (slika 1):

- silicijev detektor verteksov (*Silicon Vertex Detector* - SVD), katerega naloga je čim bolj natančno izmeriti točke razpadov mezonov  $B$ , zato se nahaja takoj ob cevi pospeševalnika;
- večžična proporcionalna komora (*Central Drift Chamber* - CDC), ki izmeri poti in gibalne količine nabitih delcev;

- pragovni števec Čerenkova (*Aerogel Cherenkov Counters* - ACC), ki pomaga ločevati delce, še posebej pione od kaonov;
- detektor časa preleta (*Time-of-flight Counters* - TOF) je sestavljen iz hitrih scintilatorjev, v katerih delci ustvarijo kratke pulze svetlobe. Scintilatorji so od točke interakcije oddaljeni 1.2 m in merijo čas, ki ga delci potrebujejo, da prepotujejo to razdaljo in s tem njihovo hitrost;
- elektromagnetni kalorimeter, ki ga sestavlja mreža kristalov CsI(Tl). Njegova naloga je predvsem natančno ločiti in izmeriti smeri in energije parov fotonov, ki nastanejo pri nekaterih razpadih;
- superprevodni magnet, ki ustvarja magnetno polje 1.5 T. Poti nabitih delcev so zato v detektorju ukrivljene in iz ukrivljenosti lahko določimo njihovo gibalno količino;
- detektor dolgoživih nevtralnih kaonov  $K_L$  in mionov (KLM), ki ga sestavljajo zaporedne plasti železa in detektorjev nabitih delcev.

Meritve iz posameznih detektorjev se združijo in dopolnjujejo, tako da lahko z veliko verjetnostjo identificirajo delce in izmerijo njihove lastnosti. Iz tega lahko rekonstruiramo veliko reakcij in med njimi poiščemo ter preštejemo najbolj zanimive redke razpade.

## 2.2 Detektorji Čerenkova

Če delec potuje po snovi hitreje od svetlobne hitrosti v tej snovi (hitrost elektromagnetnega valovanja v snovi z lomnim količnikom  $n$  je  $c = c_0/n$ ), seva svetlobo, ki jo imenujemo svetloba Čerenkova. Ta svetloba se glede na smer delca širi pod kotom  $\theta$ , za katerega velja:

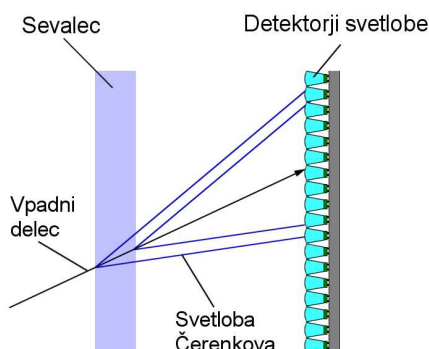
$$\cos\theta = \frac{c_0}{vn}$$

kjer je  $v$  hitrost delca. Preko merjenja kota izsevanja svetlobe Čerenkova tako lahko določimo hitrost delca. V detektorjih Čerenkova za sevalni medij uporabljamo prozorno snov s primernim lomnim količnikom. Plini imajo lomni količnik okrog 1.001, trdne snovi večjega od 1.3, na vmesnem področju pa lahko uporabimo aerogel. To je zelo lahek izolator z lomnim količnikom od 1.01 do 1.1.

Ločimo dve vrsti detektorjev Čerenkova: pragovne števec in detektorje obročev Čerenkova (*Ring Imaging Cherenkov Counters* - RICH).

Pri pragovnih števcih izberemo lomni količnik sevalnega medija tako, da svetlobo Čerenkova sevajo šele delci, ki so hitrejši od mejne hitrosti  $v = c_0/n$ . Če imamo na voljo še podatek o gibalni količini, tako lahko ločimo delce, ki so težji od izbrane mase, od tistih, ki so lažji.

Detektorje Čerenovih obročev s trdnim sevalcem sestavljata tanka plast sevalca in ravnina s pozicijsko občutljivimi fotonskimi detektorji, ki je postavljena na neki razdalji za sevalcem (slika 2). Ko delec potuje skozi sevalec, izseva stožec svetlobe Čerenkova, ki se na ravnini preslika v obroč. Iz polmera teh obročev in razdalje detektorjev od sevalca lahko določimo kot izsevanja svetlobe Čerenkova in s tem hitrost delcev.



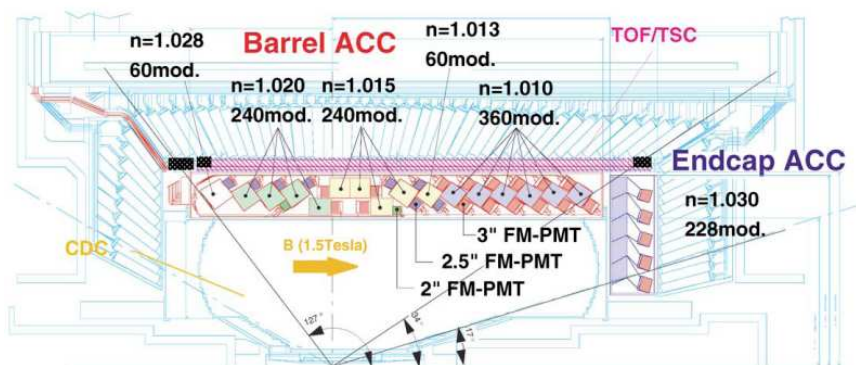
Slika 2: Shema delovanja detektorja obročev Čerenkova.

V spektrometu Belle uporabljajo pragovni števec svetlobe Čerenkova, ki je sestavljen iz 960 modulov razporejenih cilindrično okrog cevi pospeševalnika in 228 modulov, ki pokrivajo površino v smeri sipanja naprej (slika 3). Posamezen modul sestavlja plast aerogela, svetlobni vodnik iz zrcal in ena ali dve fotopomnoževalki. Glede na položaj modulov so uporabili aerogel z različnimi lomnimi količniki (uporabljeni so štiri tipi z  $n = 1.010, 1.015, 1.020$  in  $1.030$ ) in fotopomnoževalke treh velikosti (trije tipi s premeri 2", 2.5" in 3"), tako da so moduli optimizirani za razpone gibalnih količin, ki prevladujejo pri različnih kotih interakcije. Fotopomnoževalke morajo delovati v močnem magnetnem polju, zato so uporabili posebej izdelane fotopomnoževalke z mrežastimi dinodami (*fine-mesh photomultiplier tubes*). Še vedno se zaradi magnetnega polja zmanjša ojačanje fotopomnoževalk za nekaj 10 do nekaj 1000, glede na kot, pod katerim so nameščene.

## 2.3 Nadgradnja spektrometra Belle

Glavna naloga detektorja svetlobe Čerenkova v spektrometru Belle je ločevati pione od kaonov, ki pa imajo v smeri interakcije naprej zelo velik razpon gibalnih količin. V tej smeri pragovni števec ne more več najboljše ločevati teh delcev. Z detektorjem obročev Čerenkova pa bi lahko izmerili hitrosti vseh (nabitih) delcev in tako izboljšali identifikacijo delcev v smeri naprej.

Število fotonov, ki jih posamezen delec v povprečju izseva pri preletu



Slika 3: Prerez srednjega dela spektrometra Belle [1].

aerogela z debelino  $L$  je:

$$N_{\text{fot}} = L \frac{\alpha}{\hbar c} \sin^2 \theta \Delta E_f$$

kjer sta  $\theta$  kot izsevanja svetlobe Čerenkova, ki bi bil v načrtovanem detektorju približno  $20^\circ$ ,  $\Delta E_f$  pa energijski interval fotonov svetlobe Čerenkova. Za valovne dolžine svetlobe med 300 nm in 600 nm, kjer pričakujemo dobro občutljivost detektorjev svetlobe, je  $\Delta E_f = 2.1 \text{ eV}$ . Za posamezen delec tako pričakujemo v obroču Čerenkova le okrog  $N_{\text{fot}} = 25$  fotonov, zato bi morali biti uporabljeni fotonski detektorji čim bolj občutljivi na svetlobo. Obroči Čerenkova bi imeli polmer približno 7 cm, široki bi bili približno 1 cm, za dobro rekonstrukcijo obročev pa bi morala biti površina posameznega detektorja svetlobe velika okrog  $5 \times 5 \text{ mm}$ . Celotna površina, na kateri bi zaznavali obroč svetlobe Čerenkova ima obliko kolobarja, velikega približno  $3.5 \text{ m}^2$ , zato je seveda pomemben dejavnik tudi cena detektorjev, s katerimi bi morali vso to površino pokriti.

Silicijeve fotopomnoževalke so resni kandidati za takšen detektor. Po občutljivosti na svetlobo so celo boljše od fotopomnoževalk, so kompaktne, njihova velika prednost pa je neobčutljivost na magnetno polje.

Največji problem pri zaznavanju posameznih fotonov je temni šum silicijevih fotopomnoževalk, ki znaša do nekaj MHz na  $\text{mm}^2$  detektorja. Problem bi lahko obšli, če bi se pri meritvah lahko omejili na dovolj kratko časovno okno. Iz meritev drugih detektorjev bi lahko predvideli, kdaj bo delec potoval skozi naš detektor Čerenkova, nato pa sprožili meritve le za zelo kratek čas. Tako bi lahko verjetnost, da v kratkem času, ko pričakujemo fotone svetlobe, v detektorju nastane lažni sunek zaradi temnega šuma, zmanjšali na sprejemljivo nizko raven.

Trenutno imajo največje silicijeve fotopomnoževalke površino okrog  $10 \text{ mm}^2$ , pričakujemo pa, da se bo ta površina še povečala. Za celotno površino detektorja obročev Čerenkova bi tako potrebovali nekaj 10 ali

celo 100 tisoč silicijevih fotopomnoževalk. To številko bi lahko zmanjšali z uporabo svetlobnih vodnikov, ki bi na površino silicijeve fotopomnoževalke zbrali svetlobo z nekajkrat večje površine, kar bi učinkovito zmanjšalo tudi temni šum silicijevih fotopomnoževalk glede na aktivno površino.





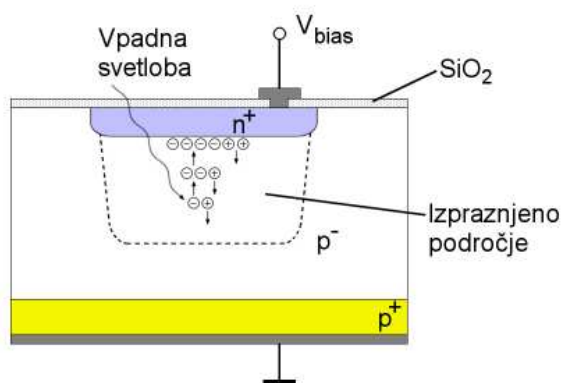
### 3 Silicijeva fotopomnoževalka

Za silicijeve fotopomnoževalke se še ni uveljavil standarden izraz. V angleščini se najpogosteje uporabljajo izrazi *Silicon Photomultiplier* (SiPM), *Solid State Photomultiplier* (SSPM) in *Multi-Pixel Photon Counter* (MPPC). V nadaljevanju besedila bom uporabljal izraz silicijeve fotopomnoževalke, za klasične fotopomnoževalke pa bom uporabljal le izraz fotopomnoževalka.

#### 3.1 Polprevodniški detektorji svetlobe

Najpreprostejši polprevodniški detektor svetlobe je fotodioda. Podobna je navadni diodi, le da je zgrajena tako, da ima izpraznjeno področje čim bolj izpostavljeno vpadni svetlobi. Fotoni vpadne svetlobe se v izpraznjenem področju lahko absorbirajo in povzročijo nastanek para elektron - vrzel. Vsak absorbirani foton torej ustvari skozi fotodiodo tok, ki pa je za en sam foton premajhen, da bi ga lahko merili. S fotodiodo lahko zaznamo le večje intenzitete svetlobe, ko se absorbira dovolj fotonov, da nastali elektroni in vrzeli ustvarijo merljiv tok.

Občutljivost fotodiode lahko izboljšamo, če jo priključimo na visoko zaporno napetost (nekaj 10 V). Električno polje v izpraznjenem področju lahko sedaj dovolj pospeši elektrone, da ti ob trku z atomi povzročijo nastanek novih parov elektron - vrzel. Fotodiode, ki so izdelane posebej za tak način delovanja, imenujemo plazovne fotodiode, s katerimi lahko dosežemo faktor pomnoževanja od 10 do 1000. Če zaporno napetost še povečamo, prične fotodioda delovati v Geigerjevem načinu, kjer absorbirani foton sproži razelektritev celotne diode. Na tak način lahko dosežemo faktor pomnoževanja  $10^6$ .



Slika 4: Prerez plazovne fotodiode s prikazanim pomnoževanjem.

## 3.2 Silicijeva fotopomnoževalka

Silicijeva fotopomnoževalka je sestavljena iz mreže plazovnih fotodiod, ki so na skupnem kristalu silicija povezane na skupni izhod in delujejo v Geigerjevem načinu. Posamezni plazovni fotodiodi rečemo piksel. Tipično so posamezni pikseli veliki od  $15\ \mu\text{m}$  do  $100\ \mu\text{m}$ , celotna površina silicijeve fotopomnoževalke pa do nekaj  $\text{mm}^2$ . Zaradi Geigerjevega načina delovanja lahko posamezen piksel že en sam foton svetlobe pretvori v merljiv električni sunek, vendar dobimo le binarno informacijo, ali je piksel zadel eden ali več fotonov, ali pa ga ni zadel noben foton. Ker so vsi pikseli na silicijevi fotopomnoževalki vezani na skupni izhod, je izhodni signal vsota signalov vseh pikselov in je sorazmeren s številom vpadnih fotonov. Sorazmernost velja, dokler je število vpadnih fotonov majhno v primerjavi s številom pikselov, pri sunkih svetlobe, ki jih sestavlja več fotonov, kot je pikselov, pa pride do nasičenja.

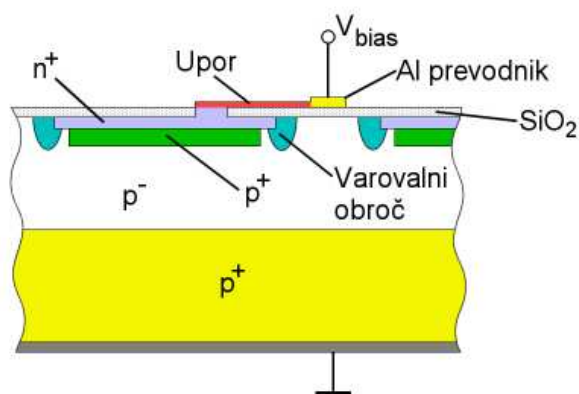


Slika 5: Primer silicijeve fotopomnoževalke (Hamamatsu S10362-11-050U) [2].

### 3.2.1 Zgradba

Osnova silicijeve fotopomnoževalke je p-dopirana plast silicija, na katero za vsak piksel implantirajo tanki plasti  $p^+$  in  $n^+$ . Med plastema se ustvari izpraznjeno območje, v delu katerega je električno polje dovolj visoko, da so izpolnjeni pogoji za Geigerjevo razelektritev. Področje Geigerjevega načina delovanje je ponavadi debelo manj kot  $1\ \mu\text{m}$  in prav toliko oddaljeno od površine detektorja, ki je zaščitena s tanko plastjo  $\text{SiO}_2$ . Vsak piksel je preko majhnega upora povezan na skupne prevodne trakove iz aluminija. Za dodatno izolacijo med pikseli in oblikovanje električnega polja znotraj posameznega piksela so ti obdani z  $n^-$  varovalnimi obroči.

Svetloba različnih valovnih dolžin se absorbira na različnih globinah v pikslu. Absorpcijska dolžina v siliciju je za modro svetlobo ( $\lambda = 410\ \text{nm}$ )  $0.16\ \mu\text{m}$ , za rdečo ( $\lambda = 639\ \text{nm}$ ) pa  $3.65\ \mu\text{m}$ , kar v primerjavi z debelino Geigerjevega območja  $1\ \mu\text{m}$  pomeni, da se večina modre svetlobe absorbira pred Geigerjevim območjem, večina rdeče svetlobe pa globoko za njim. Nosilci naboja morajo tako najprej potovati do Geigerjevega območja,



Slika 6: Prerez silicijeve fotopomnoževalke.

kar vpliva na obliko in časovno ločljivost sunkov. Pri izdelavi lahko z različnimi debelinami in položaji dopiranih plasti optimizirajo silicijeve fotopomnoževalke za različne valovne dolžine svetlobe.

### 3.2.2 Signali

Naboj v signalu iz posameznega piksla  $Q$  je odvisen od kapacitete piksla  $C$  in delovne napetosti  $V_{nap}$ :

$$Q = C \cdot (V_{nap} - V_{prag})$$

kjer je  $V_{prag}$  napetost, pri kateri se prične Geigerjev način delovanja. Tipične vrednosti so:  $C = 100$  fF in  $V_{nap} - V_{prag}$  nekaj V, torej je tipično naboj iz enega piksla  $Q = 100$  fC in s tem ojačanje enega piksla  $Q/e_0$  okrog  $10^6$ . Tako so že iz posameznih pikslov sunki dovolj veliki, da na  $50 \Omega$  uporu dobimo signale, velike nekaj mV. Piksli delujejo na isti napetosti in se med seboj po kapaciteti zelo malo razlikujejo, zato so si signali iz različnih pikslov zelo podobni. Ločljivost porazdelitve naboja je zato zelo dobra in brez težav ločimo vrhove, ki ustrezajo različnemu številu sproženih pikslov.

Zaradi zelo majhne debeline območja Geigerjeve razelektritve je razvoj Geigerjevega plazju zelo hiter (okrog 100 ps), iz vezja, v kakršnem imamo silicijevo fotopomnoževalko ponavadi vezano, pa dobimo sunke, ki tipično trajajo do nekaj ns.

### 3.2.3 Občutljivost na svetlobo

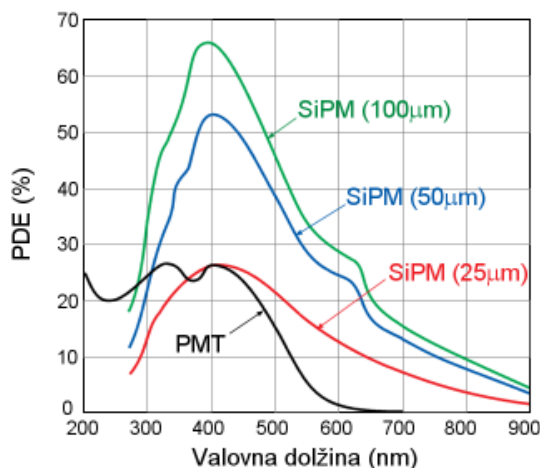
Za izkoristek silicijeve fotopomnoževalke se uporablja izraz učinkovitost zaznavanja fotonov (*Photon Detection Efficiency* - PDE), ki ga sestavlja več prispevkov:

$$PDE = QE \cdot \epsilon_G \cdot A_{pikslov} / A_{celoten}$$

Tu so:

- $QE$  kvantni izkoristek posameznih pikslov, ki je tipično od 50% do 80% [3] in odvisen od valovne dolžine;
- $\epsilon_G$  verjetnost, da nosilec naboja sproži Geigerjevo razelektritev (tipično nad 60%). Verjetnost za Geigerjevo razelektritev in s tem izkoristek silicijeve fotopomnoževalke narašča z delovno napetostjo (z večanjem razlike  $V_{nap} - V_{prag}$ ), vendar s tem narašča tudi temni šum;
- $A_{pikslov}/A_{celoten}$  geometrijski izkoristek (razmerje aktivne in celotne površine pikslov). Določen del površine detektorja je potreben za upore in varovalne obroče, ki pripadajo posameznim pikslom in prevodne trakove, ki jih povezujejo. Aktivne površine je zato le okrog 50%, odvisno od oblike in velikosti pikslov.

Tipično je PDE silicijevih fotopomnoževalk boljši ali vsaj primerljiva s kvantnim izkoristkom klasičnih fotopomnoževalk, PDE nekaterih silicijevih fotopomnoževalk je pri valovnih dolžinah za katere so optimizirane celo nad 60% (slika 7).



Slika 7: Občutljivost tipične fotopomnoževalke in treh silicijevih fotopomnoževalk proizvajalca Hamamatsu, ki se razlikujejo po velikosti pikslov [2].

Zaradi končnega števila pikslov na silicijevi fotopomnoževalki je omejeno tudi največje število fotonov, za katero je silicijeva fotopomnoževalka še uporabna. Dokler nanjo svetimo s šibkimi pulzi, v katerih je manj fotonov kot je pikslov na detektorju, posamezne piksle večinoma sproži le po en foton. Število sproženih pikslov in s tem signal iz silicijevih fotopomnoževalk je sorazmerno številu vpadnih fotonov. Ko se število fotonov v vpadnih pulzih približuje številu pikslov, se povečuje verjetnost, da na en piksel pade hkrati več fotonov. Piksel pa lahko zazna le enega od teh fotonov in signal

iz silicijeve fotopomnoževalke ne ustreza več številu vpadnih fotonov. Ko pa je fotonov nekajkrat toliko kot pikslov na detektorju, se sprožijo skoraj vsi piksli in je detektor v nasičenju. Ponavadi za zgornjo mejo števila fotonov, pri kateri je detektor še uporaben za merjenje intenzitete, vzamemo  $N_{max} = 0.6 \times N_{pikslov}$ . V resnici to velja le za hitre sunke, saj se pri sunkih, daljših v času, posamezni piksli lahko opomorejo med zaporednimi zadetki. Tipično so mrtvi časi pikslov manjši od 100 ns.

### 3.2.4 Temni šum

Izvor temnega šuma so termično vzbujeni nosilci naboja v občutljivi prostornini pikslov. Temni šum narašča z delovno napetostjo, pri sobni temperaturi tipično znaša okrog 1 MHz na  $\text{mm}^2$  površine, pri temperaturi  $100^\circ\text{K}$  pa se zniža na nekaj kHz/ $\text{mm}^2$ . Temni šum predstavlja glavno oviro za zaznavanje posameznih fotonov pri sobni temperaturi, še posebej kadar potrebujemo detektorje z veliko površino.

Pri zaznavanju posameznih fotonov je pomemben vir šuma tudi optični presluh. Po Geigerjevi razelektritvi v pikslu ostane veliko atomov v vzbujenih stanjih, ki lahko izsevajo foton blizu vidne svetlobe. Ta se lahko absorbira v katerem od sosednjih pikslov in sproži lažen sunek. Optični presluh narašča z ojačanjem pikslov, lahko pa ga omejimo z dodatnimi elementi v zgradbi detektorja (kanalčki med piksli, ki ne prepuščajo svetlobe), vendar ti še dodatno zmanjšajo aktivno površino in s tem izkoristek detektorja.

### 3.2.5 Druge lastnosti

Silicijeve fotopomnoževalke imajo pred klasičnimi še precej prednosti:

- so mnogo manj občutljive na poškodbe kot fotopomnoževalke, ki jih sestavlja stekleno ohišje, ki zadržuje vakuum;
- so bolj kompaktne in lažje;
- delujejo pri nižjih napetostih (do 100 V);
- ker dajejo velike signale ne potrebujejo nabojno občutljivih predojačevalnikov;
- niso občutljive na močna zunanja magnetna polja;
- pri masovni proizvodnji pričakujemo nizko ceno.

Glavni omejitvi pri uporabi silicijevih fotopomnoževalk pa sta majhna aktivna površina in temni šum. Vendar se je tehnologija silicijevih fotopomnoževalk šele dobro pričela razvijati in izdelovalci ponujajo detektorje z vedno večjimi površinami in vedno manjšim šumom. Prav tako

je možnih še veliko optimizacij za različne namene uporabe (občutljivost na različne valovne dolžine, razmerja med aktivno površino in izkoristkom, razmerje med velikostjo in številom pikslov ...). Že kmalu utegnejo silicijeve fotopomnoževalke zamenjati druge detektorje svetlobe na veliko področjih uporabe, če naštejemo le nekaj primerov:

- v detektorjih svetlobe Čerenkova (npr. v spektrometrih Belle, BaBar), kjer so potrebni detektorji, ki v močnih magnetnih poljih in zelo omejenem prostoru lahko zaznavajo tudi posamezne fotone;
- vesoljski teleskopi (npr. EUSO), pri katerih sta pomembna čim manjša teža in poraba energije;
- uporaba v medicini, npr. za pozitronsko tomografijo (*Positron Emission Tomography* - PET), kjer bi dobra časovna ločljivost silicijeve fotopomnoževalke lahko izboljšala ločljivost slik, neobčutljivost na magnetna polja pa omogoča kombiniranje naprave za PET z nuklearno magnetno resonanco.

## 4 Meritve lastnosti silicijevih fotopomnoževalk

Opravil sem meritve, katerih namen je bilo ugotoviti, ali so silicijeve fotopomnoževalke primerne za detektor obročev Čerenkova. Preučil sem njihov odziv na zelo šibke pulze svetlobe in preveril, kako na takšne meritve vpliva temni šum in ali bi se dalo z natančnimi meritvami časa sunkov obiti problem temnega šuma.

Meril sem lastnosti silicijevih fotopomnoževalk treh proizvajalcev: MEPhi / PULSAR, CPTA(Moscow) in Hamamatsu. Podatki merjenih silicijevih fotopomnoževalk so zbrani v tabeli 1.

Detektor		Oznaka	Površina (mm <sup>2</sup> )	Število pikslov	Velikost piksla ( $\mu\text{m}$ )
MEPhi/PULSAR		E407	1.2	1156	33
MRS APD		S137	1	556	43
Hamamatsu	S10362.11.100C	H100C	1	100	100
	S10362.11.050C	H050C		400	50
	S10362.11.025C	H025C		1600	25

Tabela 1: Lastnosti in oznake petih silicijevih fotopomnoževalk, ki sem jih preizkušal.

Detektorja E407 in S137 sta predstavnika ene od zgodnjih generacij silicijevih fotopomnoževalk, detektorji proizvajalca Hamamatsu pa so eni izmed prvih komercialno dosegljivih silicijevih fotopomnoževalk. Detektor S137 ima aktivno površino oblikovano v približku kroga, ostali detektorji pa v obliki kvadrata. Trije tipi detektorjev proizvajalca Hamamatsu se razlikujejo predvsem po velikosti in številu pikslov in so dober primer optimizacije za različne uporabe.

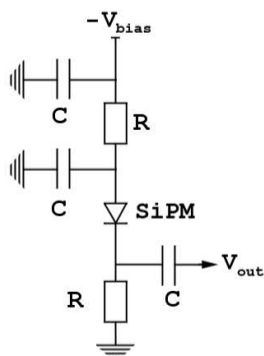
Vsak piksel na površini detektorja potrebuje dodatne elemente (varovalni obroč, upor in povezavo na skupni izhod), ki imajo neko končno velikost. Ko piksle manjšamo, postaja odstotek površine, ki jo pokrivajo dodatni elementi vedno večji. Z večjimi piksli tako dosežemo boljši geometrijski izkoristek in s tem boljši PDE celotnega detektorja, vendar več aktivnega volumna pomeni tudi več temnega šuma (tabela 2). Od skupnega števila pikslov je odvisno tudi, kolikšna je največja intenziteta svetlobe, za katero je detektor še uporaben. Medtem ko je detektor s 100 piksli uporaben za merjenje pulzov svetlobe le do približno 60 fotonov, je detektor s 1600 piksli uporaben za pulze do skoraj 1000 fotonov. Silicijeve fotopomnoževalke z manjšim številom velikih pikslov so torej uporabne v primerih, ko želimo s čim večjim izkoristkom zaznati zelo majhne intenzitete svetlobe (npr. v detektorjih svetlobe Čerenkova), takšne z velikim številom pikslov pa lahko uporabimo za merjenje večjih intenzitet svetlobe, kjer je pomembnejša linearnost odziva (npr. PET, kalorimetri).

	H025C	H050C	H100C
geometrijski izkoristek [%]	30.8	61.5	78.5
največji PDE [%]	25	50	65
temni šum [kHz]	104	232	372

Tabela 2: Lastnosti treh tipov detektorjev proizvajalca Hamamatsu, ki se razlikujejo predvsem zaradi različne velikosti pikslov [2].

## 4.1 Postavitev poskusa

Silicijeva fotopomnoževalka deluje kot dioda, ki sem jo v zaporni smeri priključil v preprosto čitalno vezje (slika 8), v katerem so bili  $R = 22 \text{ k}\Omega$  in  $C = 10 \text{ nF}$ . Za napajanje čitalnega vezja ( $V_{nap}$ ) je skrbel napajalnik *HAMEG Instruments Programmable Power Supply HM7044*.

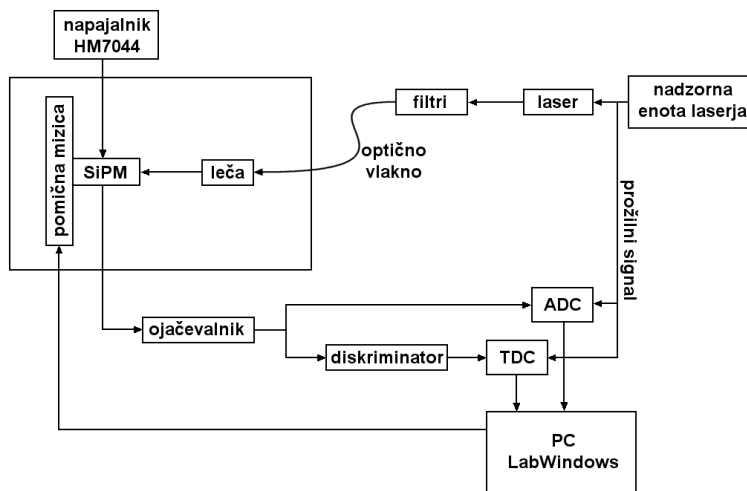


Slika 8: Čitalno vezje.

Na silicijevo fotopomnoževalko sem svetil z zelo kratkimi ( $\sigma \approx 15 \text{ ps}$ ) laserskimi sunki iz dveh *Advanced Laser Diode Systems Picosecond Injection Laser* laserkih enot modre ( $\lambda = 404 \text{ nm}$ ) in rdeče ( $\lambda = 635 \text{ nm}$ ) svetlobe. Laserska enota je svetila s frekvenco  $5 \text{ kHz}$ , iz nje sem dobil tudi prožilni signal za meritve, pulzom pa sem lahko spreminjal intenziteto z izmenljivimi nevtralnimi filtri različnih prepustnosti. Laserske pulze sem preko optičnega vlakna z ustrezno optiko pripeljal v svetlobno tesno škatlo, v kateri je bila silicijeva fotopomnoževalka. Ta je bila skupaj s čitalnim vezjem pritrjena na računalniško vodeno pomično mizico, s katero sem jo lahko z natančnostjo do  $1 \mu\text{m}$  premikal v dveh oseh (X in Y) pravokotno glede na laserske pulze. Z ročno pomično mizico sem jo lahko pomikal še v tretji osi (Z), in jo tako postavil v gorišče laserskih sunkov ali pa osvetlil celotno površino. V gorišču so imeli laserski sunki širino  $\sigma \approx 5 \mu\text{m}$ . Signale iz čitalnega vezja sem preko ojačevalnika (*EGG ORTEC FTA 820*) peljal na diskriminator (*EGG-ESN Octal Constant Fraction Discriminator CF 8000*). Digitalni izhod iz diskriminatorja sem peljal na vhod merilnika časa (*C.A.E.N. V1290A Multihit TDC*), analogni izhod pa na analogni digitalni pretvornik naboja (*LeCroy 2249A*



ADC). Oba sta za proženje uporabljala primerno zakasnjjen prožilni sunek iz nadzorne enote laserja. Časovno okno za meritev naboja je bilo dolgo 24 ns, TDC pa je lahko zbral več zaporednih sunkov v oknu  $1 \mu s$  okrog prožilnega sunka. Meritve sem vodil in zbral na osebnem računalniku s pomočjo programa, ki sem ga napisal v okolju *LabWindows/CVI* (*National Instruments*).



Slika 9: Shema celotne postavitve poskusa.

S takšno postavitvijo (slika 9) sem lahko meril porazdelitev naboja sunkov (ADC) in časovno porazdelitev sunkov (TDC), s premikanjem silicijeve fotopomnoževalke v goriščni ravnini laserskih pulzov pa sem dobil slike površinske občutljivosti detektorjev.

## 4.2 Rezultati

### 4.2.1 Ojačanje in delovne napetosti

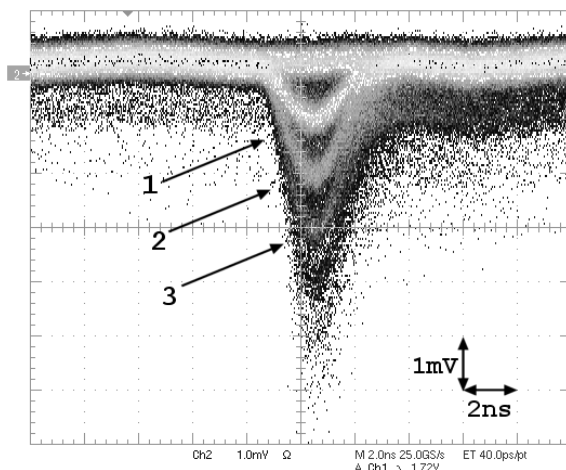
Ojačanje silicijeve fotopomnoževalke lahko ocenimo iz naboja sunkov, ki ustrezajo enemu sproženemu pikslu ( $Q$ ), kot  $Q/e_0$ , kjer je  $e_0$  osnovni naboj. Na sliki 10 vidimo, da je signal, ki ustreza enemu sproženemu pikslu, visok približno 1 mV in dolg približno 2 ns, torej je njegov naboj na uporu  $50 \Omega$ :

$$Q = \frac{U \cdot t}{R} = \frac{1 \text{ mV} \cdot 2 \text{ ns}}{50 \Omega} \approx 10^{-14} \text{ As}$$

Ojačanje enega piksla je tako:

$$\frac{Q}{e_0} = \frac{10^{-14} \text{ As}}{1.6^{-19} \text{ As}} \approx 10^5$$

Odvisnost ojačanja od delovne napetosti ( $V_{nap}$ ) sem lahko ocenil preprosto iz višine sunkov, ki je sorazmerna naboju. Na silicijevo fotopomnoževalko



Slika 10: Signali iz silicijeve fotopomnoževalke E407 na osciloskopu. Vidni so signali, ki ustrezajo enemu, dvema, trem ... hkrati sproženim pikslom.

sem svetil z zelo šibkimi pulzi svetlobe in meril višine sunkov, ki ustrezajo enemu sproženemu pikslu, pri delovnih napetostih nekaj voltov pod in nad priporočeno delovno napetostjo, ki so jo za vsak detektor podali proizvajalci (slika 11).

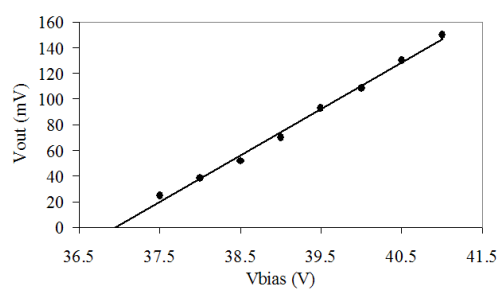
Ojačanje narašča linearno v zelo širokem področju delovnih napetosti, vendar v praksi raje delamo pri nižjih napetostih, saj z napetostjo narašča tudi temni šum. Vse meritve v nadaljevanju sem opravil pri priporočenih delovnih napetostih (tabela 3). Iz odvisnosti ojačanja od delovne napetosti sem ocenil še napetost, pri kateri se prične Geigerjev način delovanja ( $V_{prag}$ ). Linearnemu delu meritev sem prilagodil premico in ocenil  $V_{prag}$  iz njenega presečišča z absciso (tabela 3).

	E407	S137	H100C	H050C	H025C
$V_{prag}$ (V)	36.9	49.2	69.0	69.9	69.4
$V_{nap}$ (V)	40.0	53.0	70.0	71.0	71.7

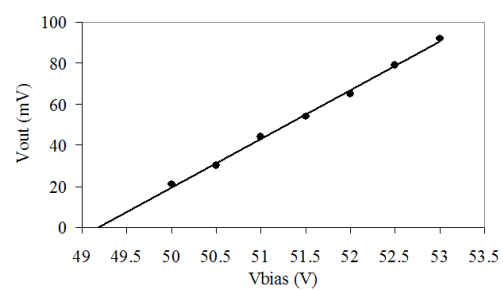
Tabela 3: Mejne ( $V_{prag}$ ) in delovne ( $V_{nap}$ ) napetosti merjenih silicijevih fotopomnoževalk.

#### 4.2.2 Temni šum

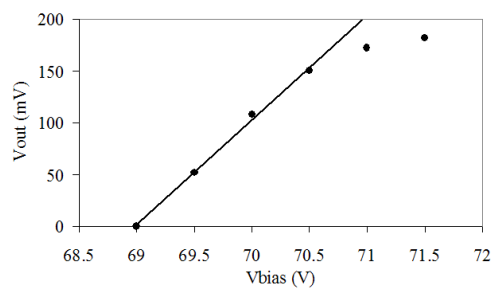
Izmeril sem temni šum silicijevih fotopomnoževalk v odvisnosti od delovne napetosti pri sobni temperaturi ( $T = 24^{\circ}\text{C}$ ). Pri izklopljenem laserju sem ojačan signal iz silicijeve fotopomnoževalke peljal na diskriminator, katerega nivo proženja sem pri vsaki delovni napetosti posebej nastavljal na polovico višine sunka, ki ustreza enemu sproženemu pikslu. Na števcu (*C.A.E.N. N145 Quad Scaler and Preset Counter Timer*) sem izmeril število sunkov iz



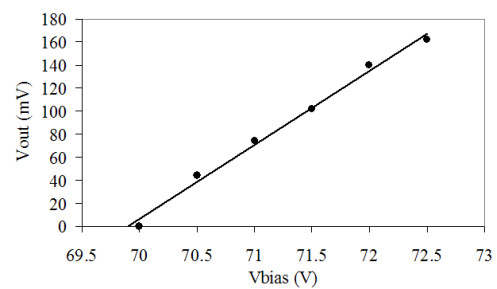
(a) E407



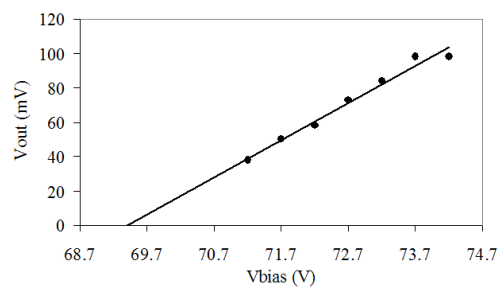
(b) S137



(c) H100C



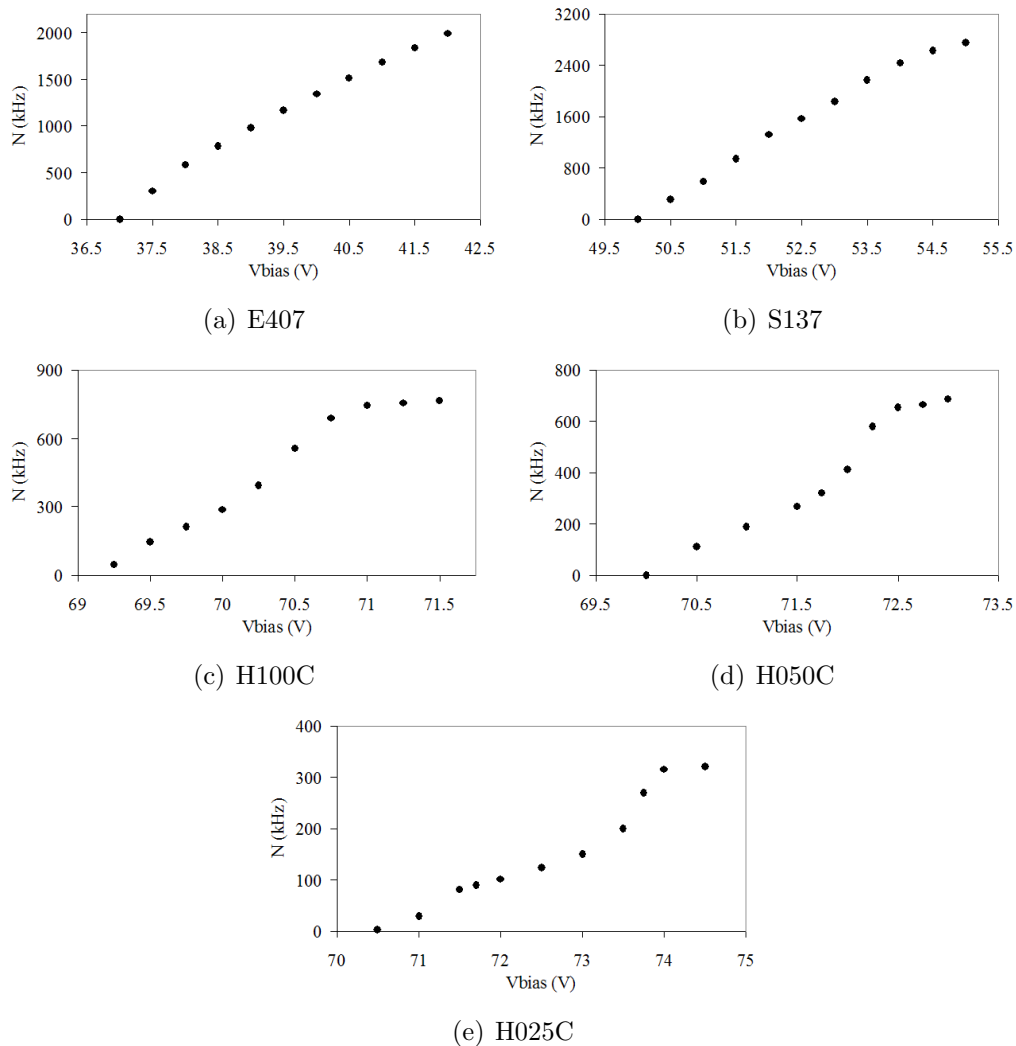
(d) H050C



(e) H025C

Slika 11: Odvisnost ojačanja od  $V_{nap}$ .

diskriminatorja na sekundo in tako določil temni šum pri različnih delovnih napetostih (slika 12). Temni šum tako kot ojačanje pri delovnih napetostih blizu priporočenih delovnih napetosti narašča približno linearno. Pri detektorjih proizvajalca Hamamatsu se približno 1 V nad priporočeno delovno napetostjo pojavi nasičenje temnega šuma.



Slika 12: Odvisnost temnega šuma od od  $V_{nap}$ .

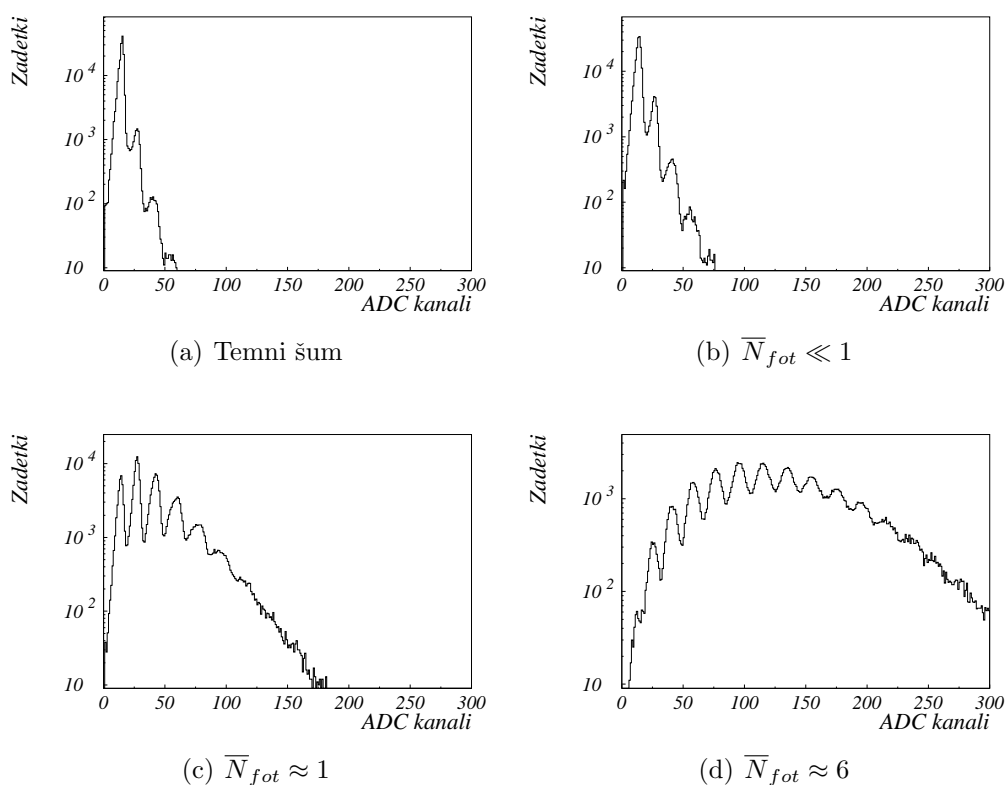
V tabeli 4 sem zbral podatke o temnem šumu silicijevih fotopomnoževalk pri priporočenih delovnih napetostih, kot so jih podali proizvajalci in kot sem jih izmeril jaz. Vrednosti, ki sem jih izmeril, so malce nižje od podanih, kar pa lahko pripišemo malo drugačnim pogojem pri meritvi. Opazna je tudi velika razlika med starejšima detektorjema E407 in S137 ( $N \approx 1$  MHz) ter novejšimi detektorji proizvajalca Hamamatsu ( $N \approx 100$  kHz).

	<b>E407</b>	<b>S137</b>	<b>H100C</b>	<b>H050C</b>	<b>H025C</b>
Temni šum (proizvajalci)	–	–	372 kHz	232 kHz	104 kHz
Temni šum (izmerjeni)	1.3 MHz	1.8 MHz	289 kHz	188 kHz	89 kHz

Tabela 4: Temni šum silicijevih fotopomnoževalk pri priporočenih delovnih napetostih in temperaturi  $T = 24^\circ\text{C}$ .

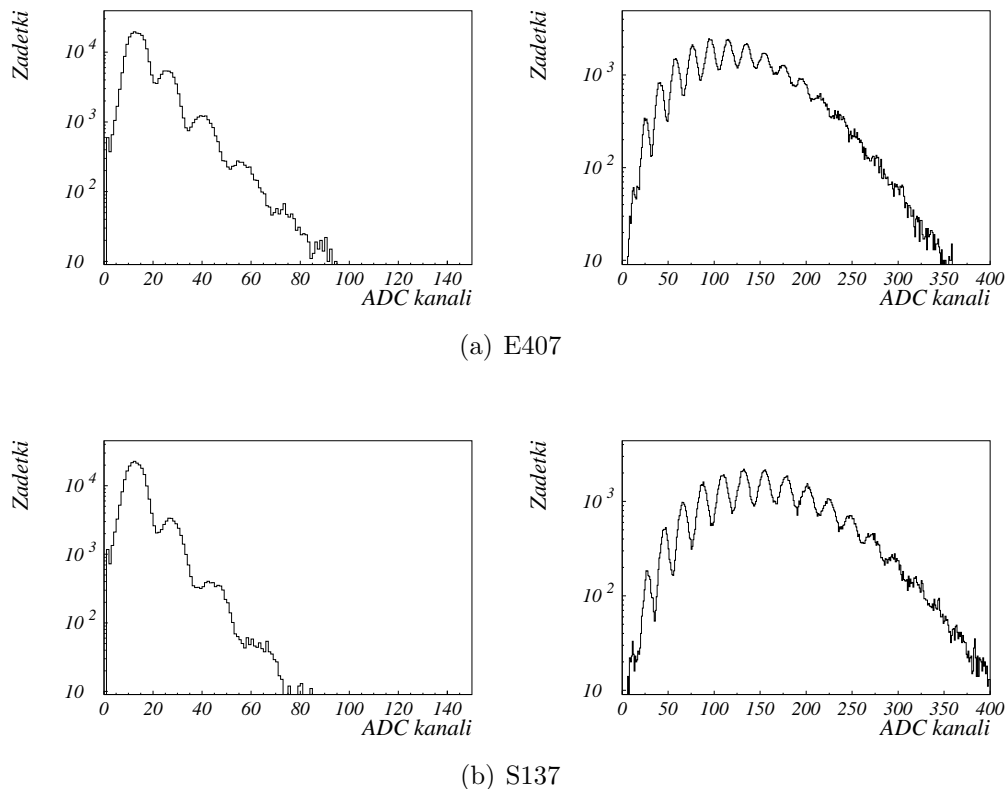
### 4.2.3 Porazdelitev naboja

Signali iz posameznih pikslov se med seboj zelo malo razlikujejo, zato so na porazdelitvah naboja jasno vidni vrhovi, ki ustrezajo različnemu številu sproženih pikslov. Na sliki 13 so prikazane izmerjene porazdelitve naboja za detektor E407 v temi in pri treh različno močnih osvetlitvah.



Slika 13: Porazdelitve naboja E407 pri različnih osvetlitvah.

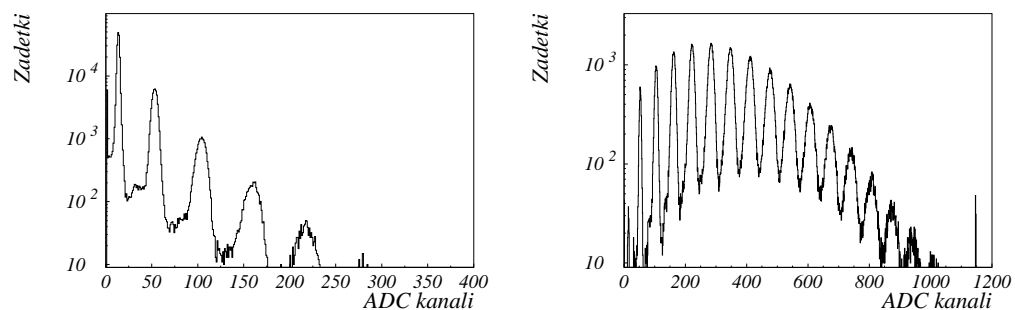
Na porazdelitvi naboja temnega šuma (slika 13(a)) prevladujejo sunki iz samo enega piksla. To so sunki, ki jih sprožijo termično vzburjeni nosilci naboja v aktivni prostornini piksla. Vidimo pa tudi približno 10% sunkov, ki ustrezajo dvema hkrati sproženima piksloma. Ti sunki so predvsem posledica optičnega presluha med piksli, včasih pa v okno ADC prideta tudi dva zaporedna šumna signala. Ti sunki predstavljajo stalno ozadje pri merit-



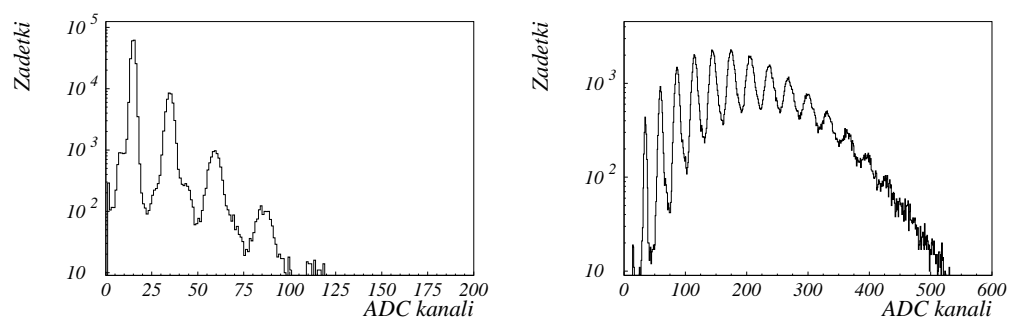
Slika 14: Izmerjene porazdelitve ADC, na levi za  $\overline{N}_{fot} \ll 1$  in na desni za  $\overline{N}_{fot} \approx 6$ .

vah. Možni so tudi tri- in večkratni sunki, verjetnost za katere pa je zelo majhna. Iz razmerja višine vrhov v porazdelitvi naboja lahko ocenimo povprečno število sproženih pikslov, iz tega pa povprečno število fotonov v sunkih vpadne svetlobe. Čeprav intenzitete vpadne svetlobe nisem imel umerjene, npr. z vzporedno meritvijo s fotopomnoževalko, sem zato lahko zgolj s pomočjo oblike porazdelitve naboja same silicijeve fotopomnoževalke nastavljal intenzitete laserskih pulzov. Izmerjene porazdelitve ADC vseh silicijevih fotopomnoževalk pri zelo šibkih in malo močnejših laserskih pulzih ( $\overline{N}_{fot} \ll 1$  in  $\overline{N}_{fot} \approx 6$ ) so zbrane na sliki 14.

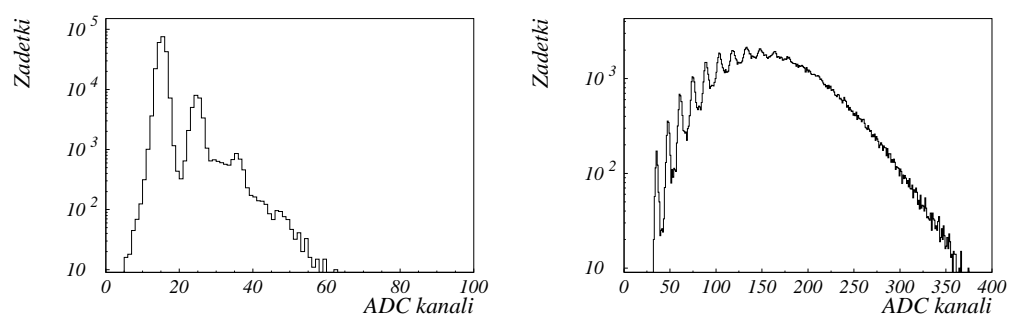
Porazdelitvi naboja detektorjev E407 in S137 sta skoraj identični, kljub različni strukturi in velikosti pikslov. Verjetno sta izdelana s podobno tehnologijo in imata podobne kapacitete pikslov in upore, s katerimi so piksli povezani. Detektorji Hamamatsuja so novejši in izdelani z boljšo tehnologijo, zato ni presenetljivo, da imajo precej boljšo ločljivost, opazna pa je tudi razlika zaradi velikosti pikslov. Večji piksli imajo večjo kapaciteto, zato so tudi njihovi signali večji. V porazdelitvi naboja so zato vrhovi premaknjeni k višjim kanalom.



(c) H100C



(d) H050C

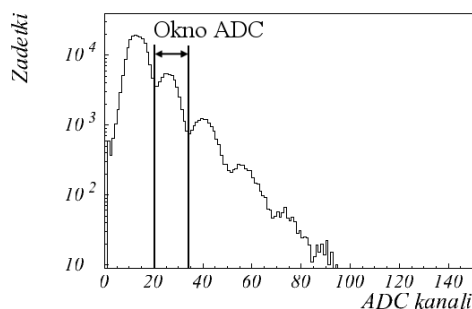


(e) H025C

Slika 14: Izmerjene porazdelitve ADC, na levi za  $\bar{N}_{fot} \ll 1$  in na desni za  $\bar{N}_{fot} \approx 6$ .

#### 4.2.4 Časovna porazdelitev sunkov

Ob meritvah porazdelitve naboja sem meril tudi časovno porazdelitev sunkov. Pretvornik TDC je izmeril čas od začetka laserskega pulza za vse signale iz silicijeve fotopomnoževalke, ki so prišli v oknu  $1 \mu\text{s}$  okrog laserskega pulza. Ker pa je ADC izmeril le naboj za enega od teh sunkov, sem na porazdelitve časa narisal le prve sunke iz TDC. Poleg tega sem narisal le sunke, ki ustrezajo enemu sproženemu pikslu, torej sunke, ki ležijo v drugem vrhu porazdelitve naboja (slika 15).



Slika 15: Tipičen ADC pri meritvah porazdelitev TDC. Označen je interval za sunke, ki ustrezajo enemu zaznanemu fotonu.

Ker večji sunki (sunki, ki ustrezajo večim hkrati sproženim pikslom) v času zrastejo hitreje, je diskriminator zanje sprožil meritev časa malce hitreje, kot za manjše sunke. Časovne porazdelitve sunkov so zato dodatno razmazane, kar se vidi na porazdelitvi časa proti naboju sunkov (slika 16(a)).

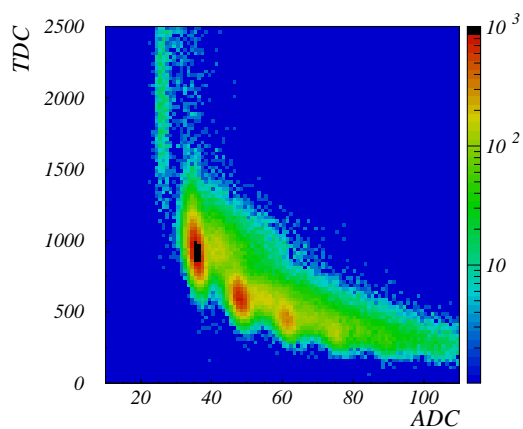
Ta prispevek k razmazanosti porazdelitve TDC sem zmanjšal tako, da sem poiskal vrhove porazdelitve časa proti naboju (slika 16(b)) in nanje prilagodil krivuljo (slika 16(c)). Za krivuljo sem vzel kvadratno funkcijo, ki dovolj dobro sledi vrhovom na porazdelitvi. Za vsak sunek sem izračunal popravljen čas, ki je enak razliki izmerjenega časa in vrednosti prilagojene krivulje pri izmerjenem naboju (kanalu ADC) tega sunka. Tako popravljene časovne porazdelitve so bolj ostre tudi do dvakrat (slika 17). Širino časovnih porazdelitev podajam kot širino ( $\sigma$ ) prilagojenih Gaussovih krivulj:

$$P1 \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{TDC - P2}{P3} \right)^2}$$

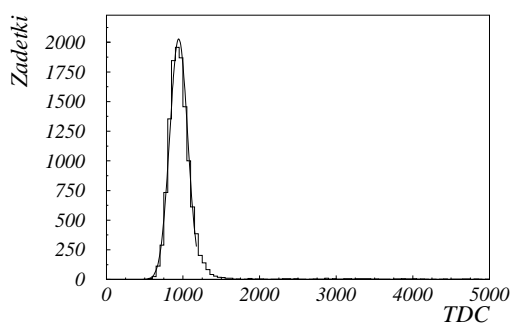
Na tak način sem določil časovne porazdelitve sunkov pri osvetlitvi s šibkimi rdečimi in modrimi laserskimi pulzi (slika 18). Intenziteto pulzov sem nastavil na podlagi porazdelitve naboja, tako da je bilo v njih povprečno število fotonov  $\bar{N}_{\text{fot}} \ll 1$  (slika 15).

Na sliki 18 so zbrane popravljene meritve časovnih porazdelitev za dve valovni dolžini vpadne svetlobe, podane pa so tudi širine prilagojenih Gaussovih krivulj ( $\sigma = P3$ ). Širine porazdelitev za vse silicijeve fotopomnoževalke

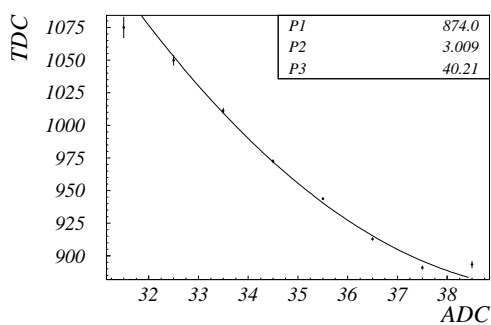




(a)

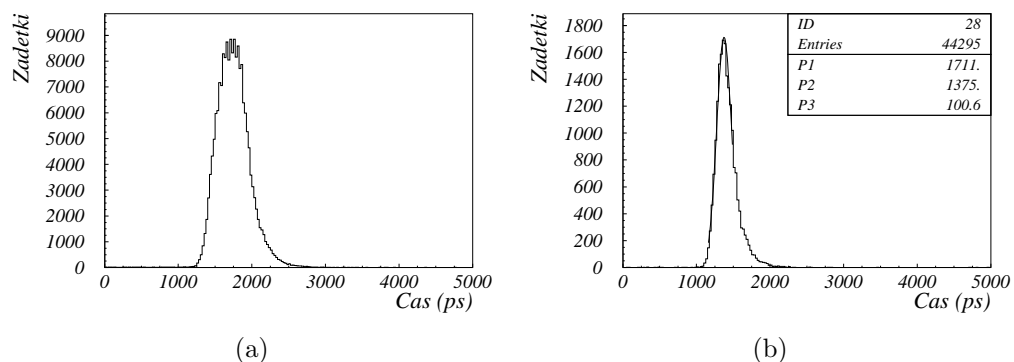


(b)

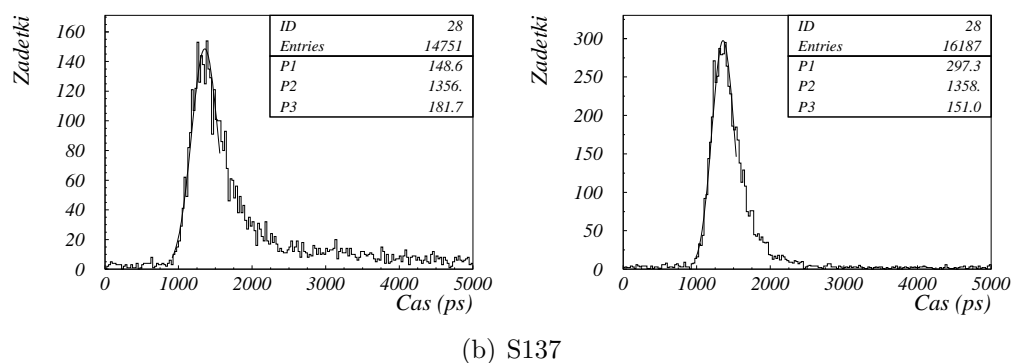
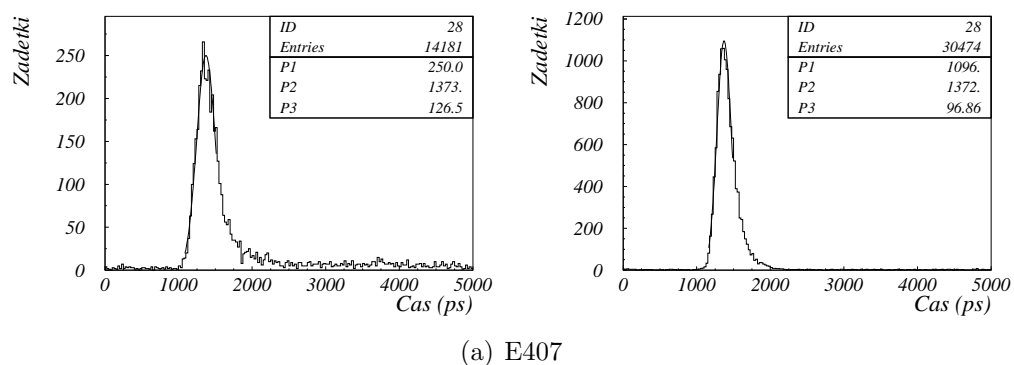


(c)

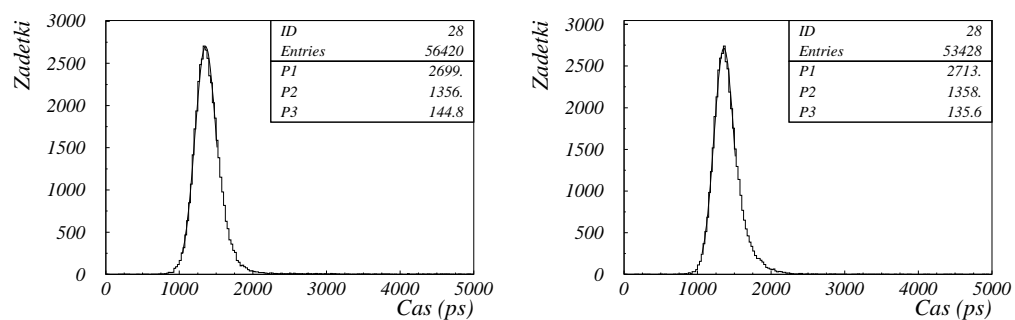
Slika 16: (a) Porazdelitev TDC proti ADC; (b) vrh TDC pri  $ADC = 34$ ; (c) krivulja  $P1 + P2 \cdot (ADC - P3)^2$ , prilagojena na vrhove porazdelitve TDC proti ADC.



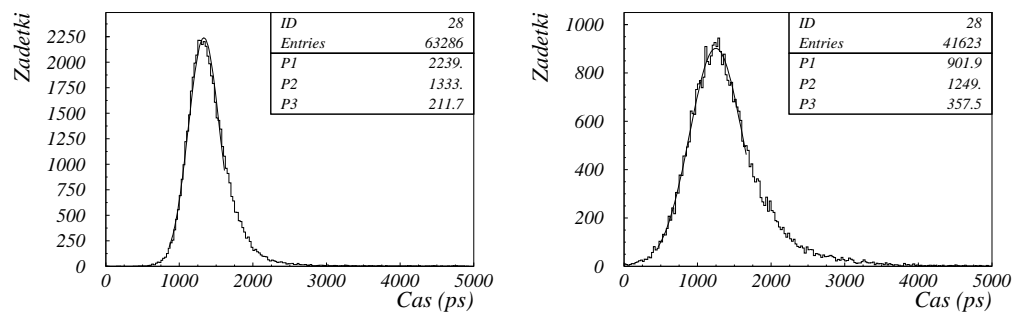
Slika 17: (a) Izmerjena in (b) popravljena porazdelitev TDC.



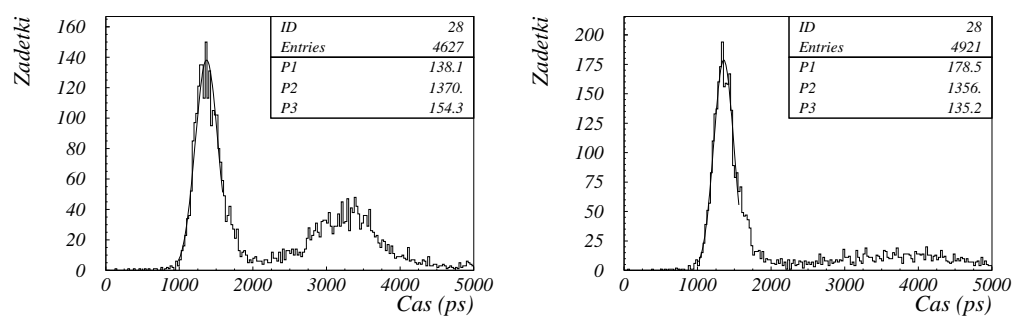
Slika 18: Popravljene porazdelitve TDC, na levi za rdečo svetlobo in na desni za modro.



(c) H100C



(d) H050C

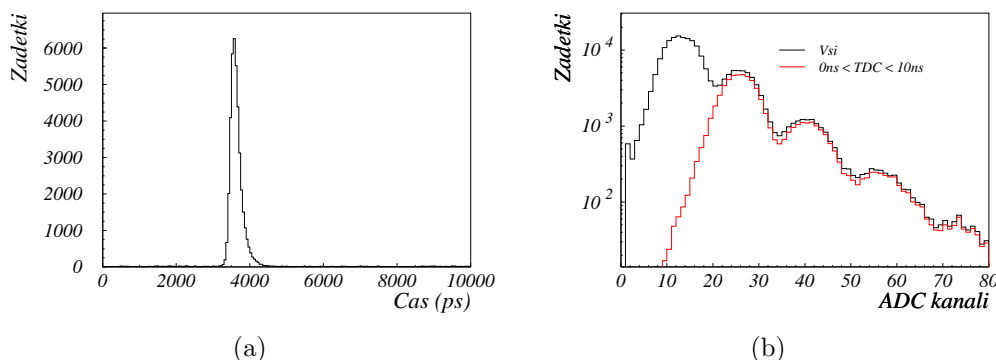


(e) H025C

Slika 18: Popravljenе porazdelitve TDC, na levi za rdečo svetlobo in na desni za modro.

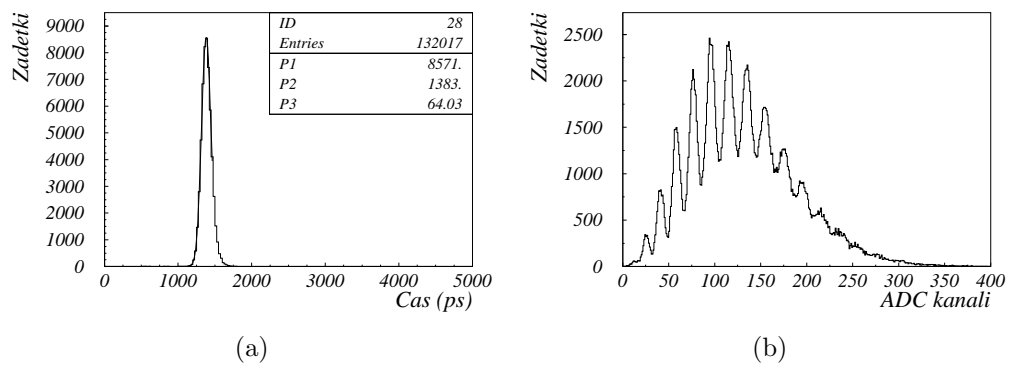
so si precej podobne, vendar opazimo, da so pri rdeči svetlobi širše in imajo bolj opazen rep, kot pri modri svetlobi. To je verjetno posledica dejstva, da se rdeča svetloba večinoma absorbira globoko za Geigerjevim območjem in morajo nosilci naboja, preden sprožijo signal, pri rdeči svetlobi potovati dlje, kot pri modri. Tipične širine časovne porazdelitve so  $\sigma \approx 100$  ps, kar pa vključuje še prispevke od širine laserskega pulza ( $\sigma \approx 15$  ps) in elektronike ( $\sigma \approx 30$  ps).

Že na nepopravljeni časovni porazdelitvi je vrh dovolj oster da se pri meritvah lahko omejimo na zelo kratko časovno okno. Na sliki 19(a) je nepopravljena časovna porazdelitev pri laserskih pulzih s povprečnim številom fotonov  $\bar{N}_{fot} \ll 1$ , na sliki 19(b) pa porazdelitev naboja za vse sunke in za sunke, ki so prišli v oknu 10 ns okrog vrha TDC. S tem, ko sem izbral le pulze iz ozkega časovnega okna, sem izločil skoraj vse šumne sunke (prvi vrh v porazdelitvi ADC), ostali so predvsem sunki, ki so jih sprožili vpadni fotoni. Na tak način torej lahko močno zmanjšamo ozadje temnega šuma in tudi pri sobni temperaturi dobro ločimo sunke, ki jih sprožijo posamezni fotoni od sunkov, ki jih povzročijo termično vzbujeni nosilci naboja ali optični presluh med piksli.



Slika 19: (a) Nepopravljena porazdelitev TDC detektorja E407 za šibke pulze svetlobe; (b) Porazdelitev ADC z vsemi signali in s signali, ki so prišli v oknu dolgem 10 ns.

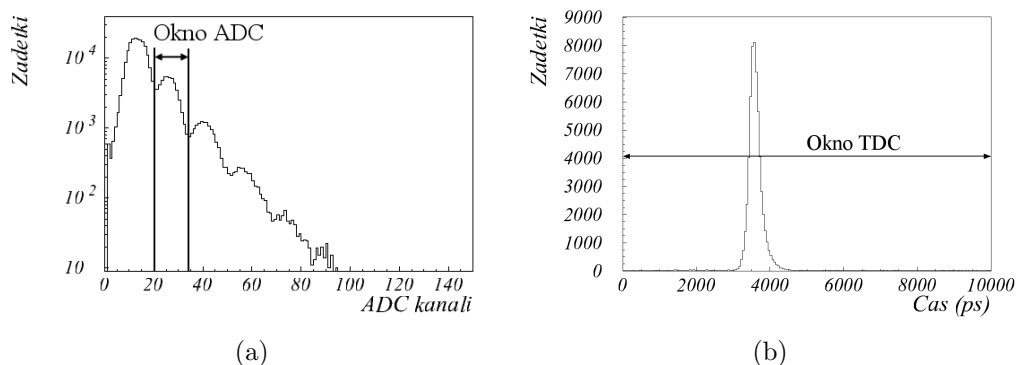
Izmeril sem tudi porazdelitve časa pri večji intenziteti laserskih pulzov (slika 20(a)). Pri tej meritvi sem v časovno porazdelitev vključil pulze iz več vrhov porazdelitve naboja (slika 20(b)). Časovna ločljivost se za sunke z večjim številom fotonov še izboljša, saj se pri več hkrati sproženih pikslih razlike med njimi izpovprečijo.



Slika 20: (a) Porazdelitev TDC detektorja E407 za močnejše pulze svetlobe; (b) Porazdelitev ADC pri tej osvetlitvi.

### 4.2.5 Površinska občutljivost

Silicijevo fotopomnoževalko sem postavil v gorišče laserskih pulzov (kjer so imeli širino  $\sigma \approx 5 \mu\text{m}$ ) in jo v korakih po  $5 \mu\text{m}$  premikal pravokotno nanje v oseh X in Y. V vsaki točki sem izmeril 3000 dogodkov, od katerih sem izbral le tiste, ki so ustrezali enemu vpadnemu fotonu (rez na porazdelitev naboja, slika 21(a)) in so padli v ozko časovno okno okrog vrha časovne porazdelitve (okno širine 10 ns, slika 21(b)). Te sunke sem narisal v 2D porazdelitvi položaja X proti Y (slika 22).



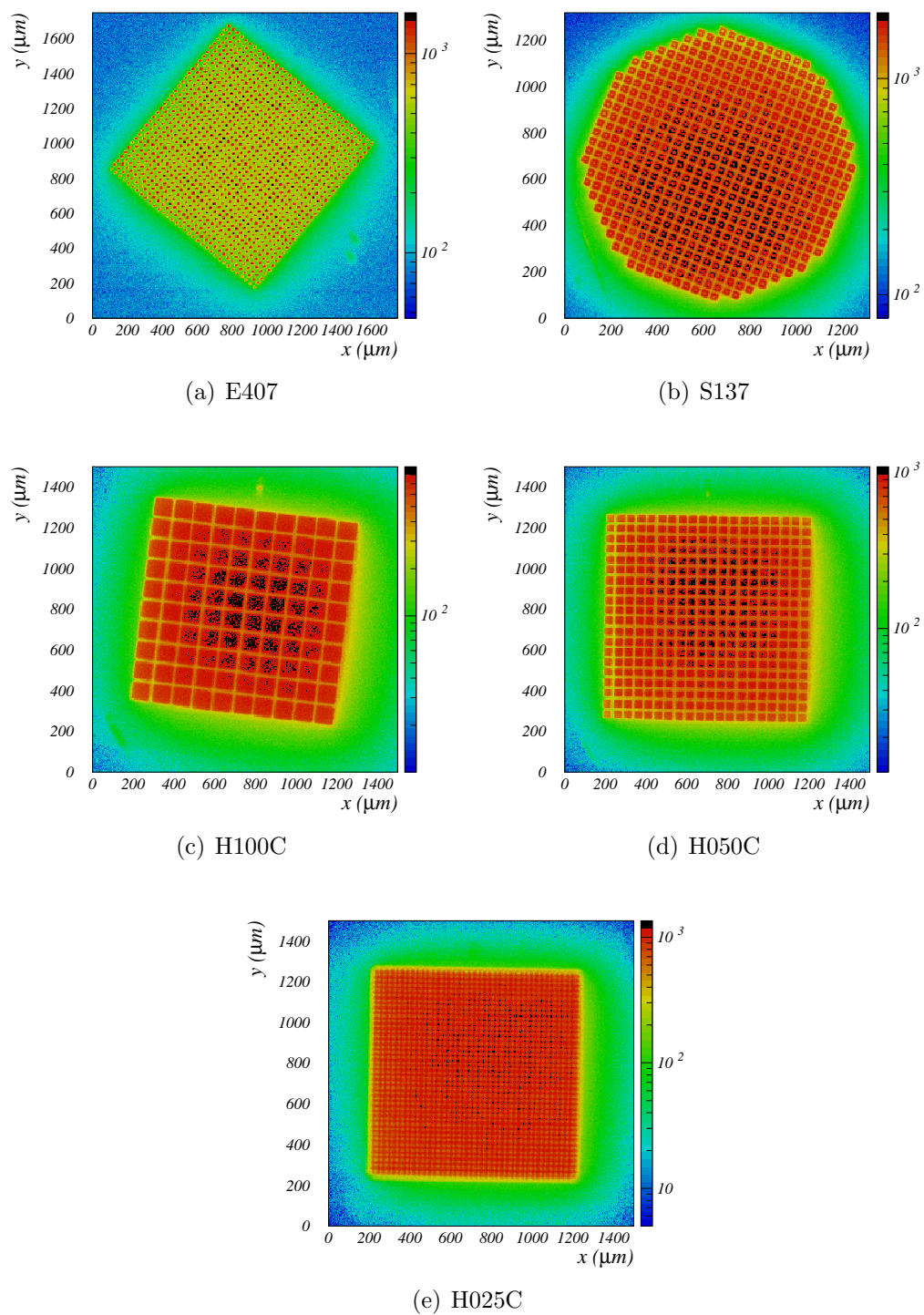
Slika 21: Tipična porazdelitev naboja (a) in časa (b) pri meritvah površinske občutljivosti.

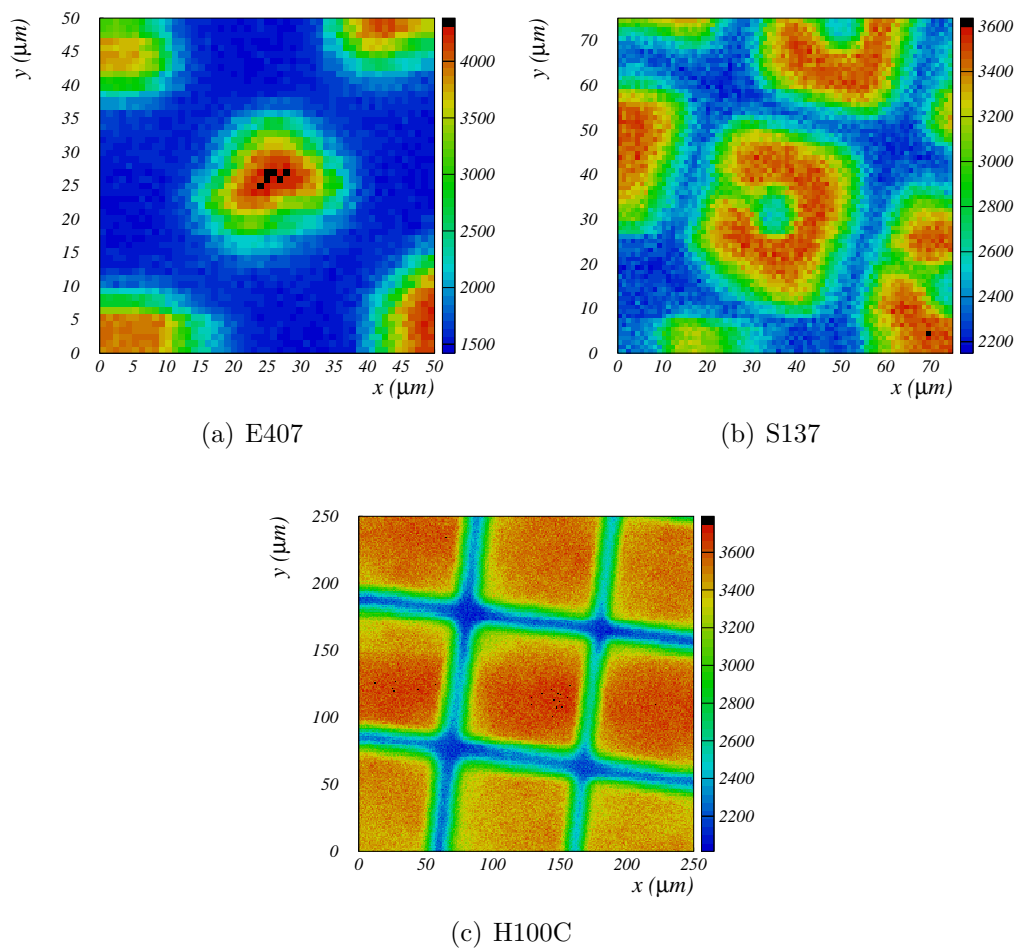
Na slikah površinske občutljivosti so dobro vidni posamezni piksli, njihova razporeditev ter neaktivna površina med njimi. Vidimo tudi, kako enakomeren je odziv vseh pikslov. Območja na slikah, kjer je odziv malo večji, so verjetno le posledica neenakomerne plasti prozorne plastike, s katero je prevlečena površina detektorja. Ta plastika lahko na nekatere pikse zbira svetlobo kot leča, zaradi sipanja v njej pa se odziv razširi tudi izven aktivne površine.

Na treh tipih detektorjev sem natančneje izmeril še površinsko občutljivost posameznega piksla. Detektor sem na manjšem območju premikal v korakih po  $1 \mu\text{m}$ , v vsaki točki pa sem izmeril  $10^4$  dogodkov (slika 23).

Detektor E407 ima na vogalih pikslov priključek, ki jih preko upora povezuje na skupno linijo, detektor S137 pa ima ta priključek na sredini piksla, od koder vodi še majhna žička. To se opazi tudi pri površinski občutljivosti piksla, ki je na sliki 23 za E407 manjša v spodnjem vogalu, za S137 pa v sredini piksla. Opazna je tudi žička, ki vodi zgoraj levo. Pri detektorju H100C pa se dobro vidi, kako velikost piksla vpliva na razmerje med aktivno in celotno površino detektorja.

Na slikah je odziv tudi na neaktivni površini med piksli velik, ponekod presega polovico največjega odziva aktivne površe pikslov. Narisal sem

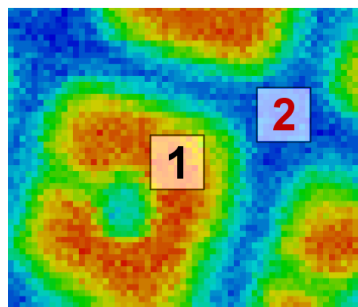
Slika 22: Izmerjene površinske občutljivosti s korakom  $5 \mu\text{m}$ .



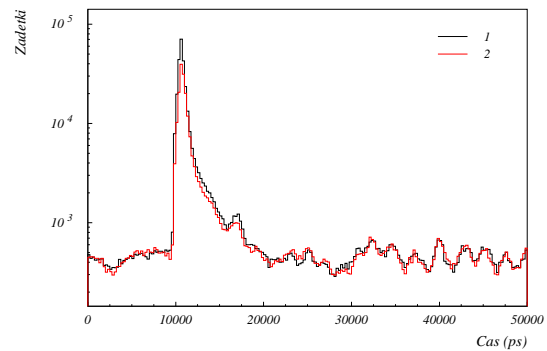
Slika 23: Izmerjene površinske občutljivosti s korakom 1  $\mu\text{m}$ .



časovni porazdelitvi za sunke, omejene na površino med piksli in za sunke z dela aktivne površine piksla (slika 24). Časovni porazdelitvi sta tako rekoč enaki, kar pomeni, da tudi sunke med aktivnimi površinami pikslov sprožijo laserski pulzi. Sunke na delih detektorja med piksli bi lahko sprožal optični presluh ali kak drug efekt v siliciju, vendar bi v tem primeru pričakovali, da bodo sunki prišli zakasnjeni glede na laserske pulze. Sunki med piksli so tako najverjetneje posledica končne širine laserskih pulzov ter sipanja na plastiki, s katero je prevlečena površina detektorja.



(a)



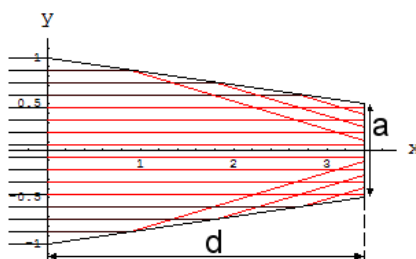
(b)

Slika 24: Časovna porazdelitev sunkov na aktivni površini piksla (1) in na površini med piksli (2).



## 5 Svetlobni vodniki

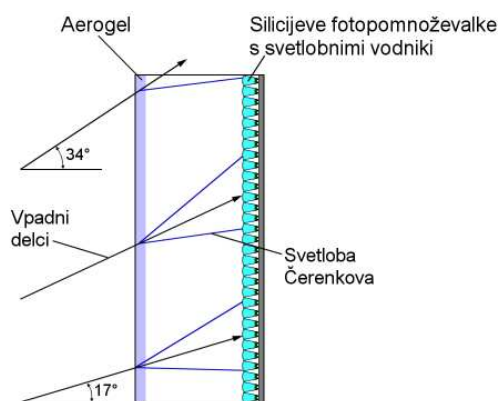
Kadar bi želeli s silicijevimi fotopomnoževalkami pokriti veliko površino, bi lahko zmanjšali število potrebnih detektorjev in izboljšali razmerje signal/šum z uporabo svetlobnih vodnikov. Vodniki bi bili izdelani iz plastike v obliki prirezane piramide (slika 25). S popolnimi odboji na stranskih ploskvah piramide bi se vpadna svetloba zbrala na zadnji ploskvi, ki bi bila v optičnem stiku z aktivno površino silicijeve fotopomnoževalke. Tako bi lahko detektor s svetlobnim vodnikom zaznaval svetlobo z nekajkrat večje površine, kot je površina samega detektorja. To razmerje med površino vstopne in zbiralne ploskve ( $M$ ), pomnoženo z izkoristkom zbiranja svetlobe, je tudi faktor, za katerega se na enoto površine detektorja z vodnikom efektivno zmanjša šum.



Slika 25: Vodnik z ravno vstopno površino.

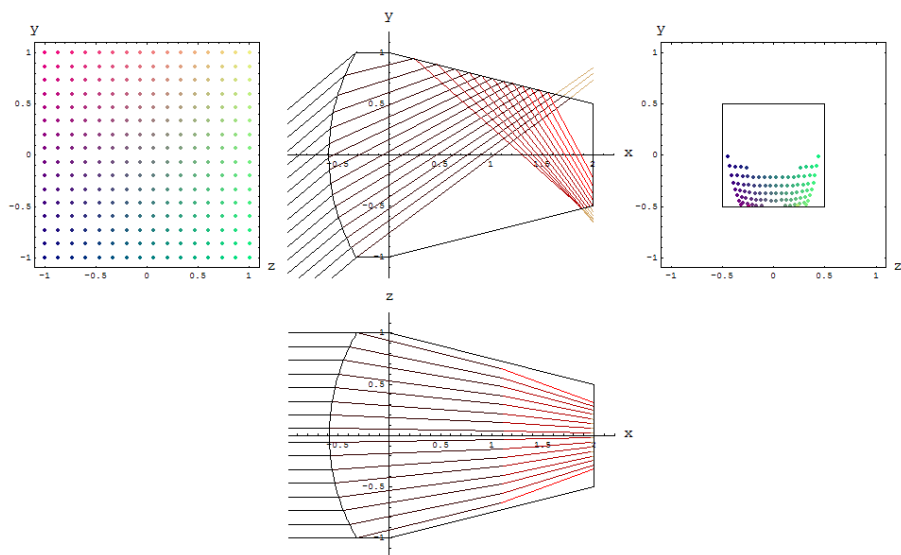
V predvideni geometriji detektorja obročev Čerenkova v Belle (slika 26) bi delci v aerogel vstopili pod koti od  $17^\circ$  do  $34^\circ$ , aerogel pa bi seval svetlobo Čerenkova pod koti do  $20^\circ$  glede na smer gibanja delcev. Na celotni površini, na kateri bi zaznavali svetlobo, bi vodniki tako morali zbirati svetlobo pod vpadnimi koti od približno  $-3^\circ$  do  $+54^\circ$  v vpadni ravnini delcev in od  $-20^\circ$  do  $+20^\circ$  pravokotno na njo. Ta zahteva predstavlja glavno omejitev za razmerje  $M$ .

Obnašanje svetlobnih vodnikov sem raziskal s pomočjo programa *Mathematica 5.1*. Za lomni količnik plastike, iz katere so narejeni vodniki, sem vzel  $n = 1.5$ . Na vstopno površino vodnika sem poslal mrežo žarkov pod različnimi koti v vpadni ravnini delcev in sledil lomom ter odbojem teh žarkov na površinah vodnika. Pri tem nisem upošteval delnega odboja na površinah, le totalni odboj na stranskih ploskvah. V resnici bi zaradi odboja na vstopni površini izgubili do 4% svetlobe, pri kotih, pri katerih ni več izpolnjen pogoj za popolni odboj na stranskih ploskvah pa zaradi delnega odboja pridobili do 1%. Prav tako nisem upošteval absorbcije, za prepustnost materiala sem vzel 100%. Iz razmerja števila vpadnih žarkov in žarkov, ki so dosegli zadnjo površino, sem ocenil izkoristek zbiranja svetlobe pri danem vpadnem kotu svetlobe, skupno uspešnost vodnika pa sem ocenil iz intervala



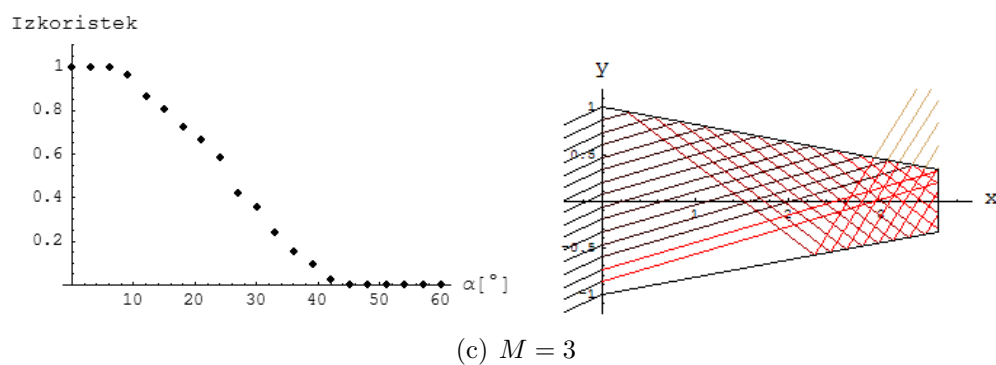
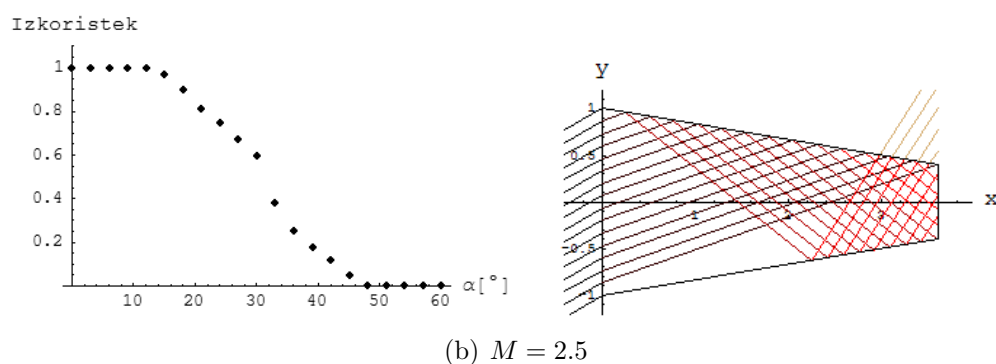
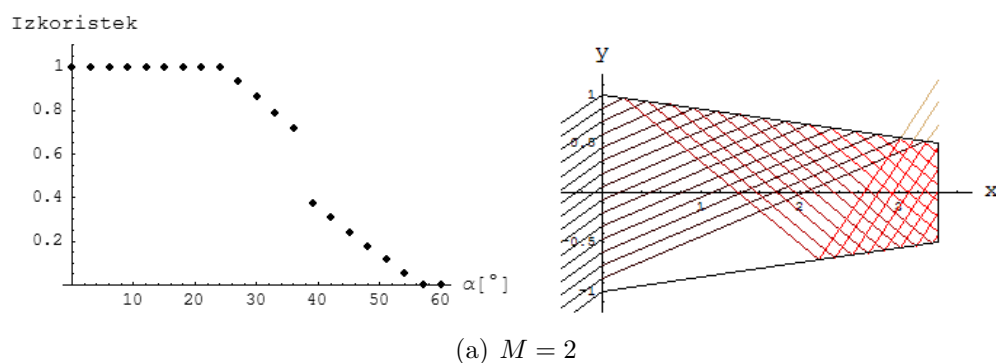
Slika 26: Načrtovani detektor obročev Čerenkova za Belle s silicijevimi fotopomnoževalkami.

kotov, v katerem je izkoristek 100% in iz povprečnega izkoristka v določenem intervalu kotov.



Slika 27: Sledenje žarkom v programu Mathematica.

Za različna razmerja  $M$  sem poiskal dolžine vodnika ( $d$ ), pri katerih je izkoristek najboljši (slika 28 in tabela 5).



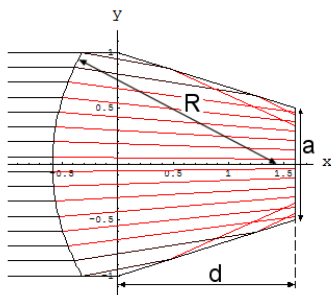
Slika 28: Izkoristki zbiranja svetlobe v odvisnosti od vpadnega kota za vodnike z ravno vstopno površino pri treh vrednostih  $M$  in poti žarkov pri velikih kotih.

Z večanjem razmerja  $M$  izkoristek vodnika hitro pada, zato sem se osredotočil na manjše razmerje,  $M = 4$ . Pri tem razmerju izkoristek vodnika z ravno vstopno površino ostane 100% do vpadnega kota  $24^\circ$ .

Za boljše zbiranje svetlobe bi lahko uporabili vodnik z ukrivljeno vstopno površino, ki deluje kot zbiralna leča s polmerom  $R$  (slika 29). Izkoristek takšnega vodnika ostane 100% do kota  $35^\circ$ , z zbiranjem žarkov z lečo torej

$M$	$d/a$	$[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$	$I$
<b>4.0</b>	3.4	$[-24^\circ, 24^\circ]$	64%
<b>6.25</b>	4.5	$[-13^\circ, 13^\circ]$	51%
<b>9.0</b>	5.4	$[-6^\circ, 6^\circ]$	42%

Tabela 5: Dolžina  $d$  simetričnega vodnika z ravno vstopno površino, pri kateri je izkoristek najboljši, interval kotov z izkoristkom 100% in povprečni izkoristek  $I$  med  $-60^\circ$  in  $+60^\circ$ .



Slika 29: Vodnik z ukrivljeno vstopno površino.

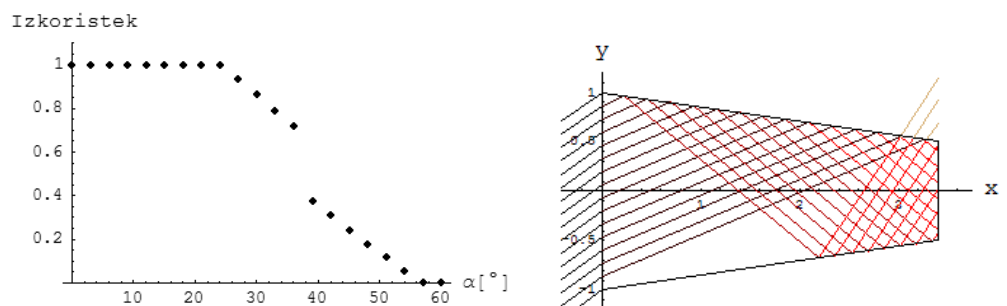
pridobimo več kot  $10^\circ$ . Glavni razlog za padec izkoristka so žarki, ki po prvem odboju ravno zgrešijo aktivno površino in zadanejo stranico pod kotom, ki je večji od kota totalnega odboja. Če se ne zanašamo na totalni odboj in stranske ploskve še metaliziramo, lahko do aktivne površine pripeljemo žarke pod še malo večjimi koti (slika 30(c)). Z vodnikom, katerega stranice bi imele odbojnost 90%, izkoristek ostane večji od 80% do  $44^\circ$  stopinj, nakar se žarki večinoma po dveh odbojih odbijejo nazaj in zapustijo vodnik čez vstopno površino.

V tabeli 6 sem zbral podatke o izkoristku in optimalne parametre za opisane tipe vodnikov: dolžino vodnika  $d$  in pri vodnikih z ukrivljeno vstopno površino polmer leče  $R$ .

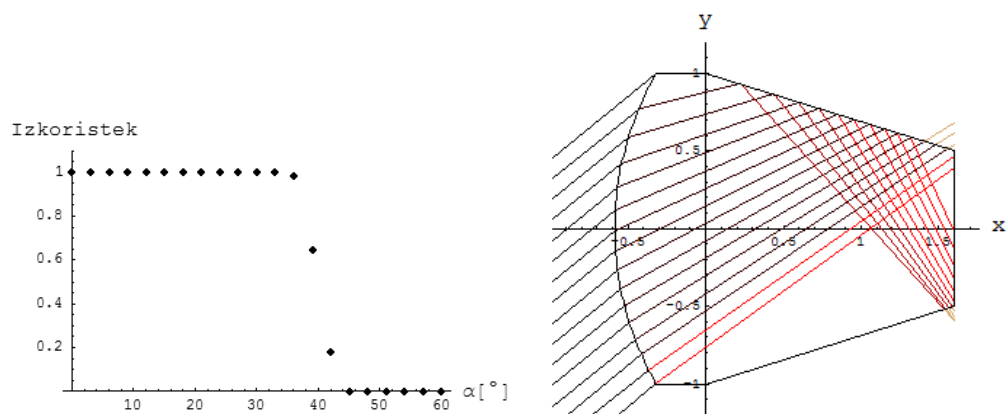
Tip vodnika	$d/a$	$R/a$	$[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$	$I$
<b>Ravna vstopna površina</b>	3.4	—	$[-24^\circ, 24^\circ]$	64%
<b>Ukrivljena površina</b>	1.6	2.0	$[-35^\circ, 35^\circ]$	66%
<b>Ukrivljena površina + odbojne stranice</b>	2.4	2.6	$[-44^\circ, 44^\circ]$	69%

Tabela 6: Parametri treh tipov vodnikov, pri kateri je izkoristek najboljši, interval kotov z izkoristkom 100% (nad 80% za vodnik z odbojnimi stranicami) in povprečni izkoristek  $I$  med  $-60^\circ$  in  $+60^\circ$ .

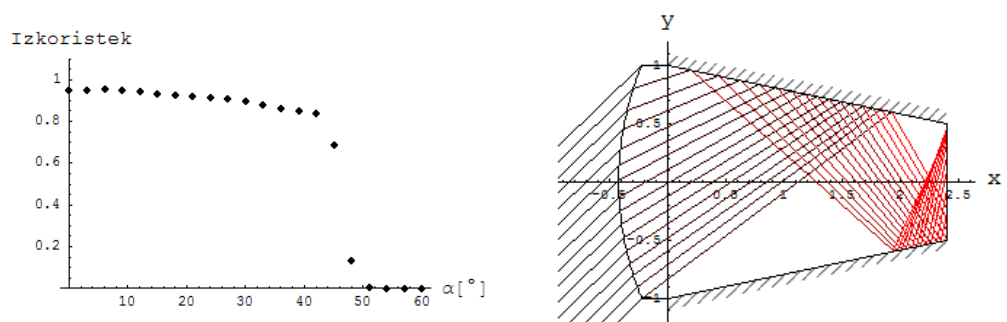
Z valovnim vodnikom z ukrivljeno površino in odbojnimi stranicami tudi pri majhnih kotih izgubimo nekaj odstotkov izkoristka zaradi nepopolne odbojnosti stranic, vendar bi lahko še vedno zadosti dobro (z izkoristkom nad 80%) zbirali svetlobo za kote od  $-44^\circ$  do  $+44^\circ$ . Vendar v predvideni geometriji ne potrebujemo dobrih izkoristkov za zelo negativne kote, zato sem



(a) Ravna vstopna površina



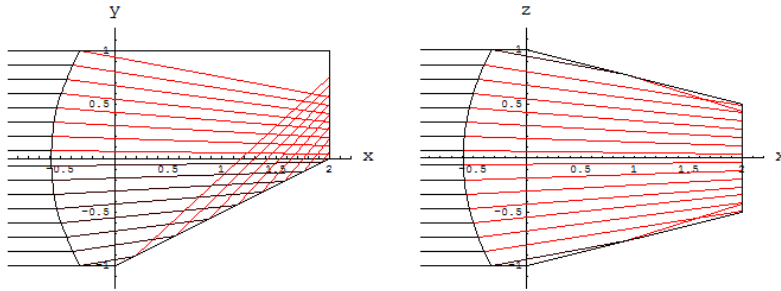
(b) Ukrivljena vstopna površina



(c) Ukrivljena vstopna površina z odbojnimi stranicami

Slika 30: Izkoristki zbiranja svetlobe v odvisnosti od vpadnega kota za tri tipe vodnikov.

raziskal še nesimetrične svetlobne vodnike (slika 31), ki na račun negativnih kotov bolje zbirajo svetlobo pri večjih vpadnih kotih (slika 32 in tabela 7).



Slika 31: Nesimetričen vodnik.

Tip vodnika	$d/a$	$R/a$	$[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$	$I$
<b>Ravna vstopna površina</b>	3.4	—	$[-6^\circ, 41^\circ]$	95%
<b>Ukrivljena površina</b>	1.6	2.0	$[-6^\circ, 58^\circ]$	100%
<b>Ukrivljena površina + odbojne stranice</b>	2.4	2.6	$[-19^\circ, 71^\circ]$	93%

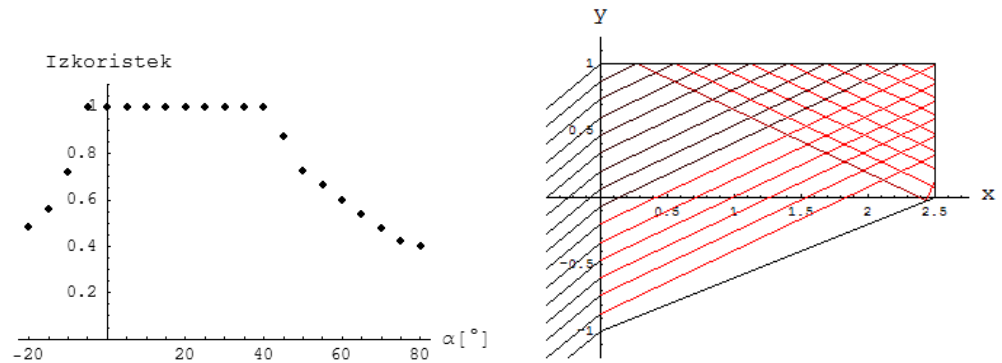
Tabela 7: Parametri treh tipov nesimetričnih vodnikov, pri kateri je izkoristek najboljši, interval kotov z izkoristkom 100% (nad 80% za vodnik z odbojnimi stranicami) in povprečni izkoristek  $I$  med  $-3^\circ$  in  $+54^\circ$ .

Pri razmerju  $M = 4$  bi že nesimetričen vodnik z ukrivljeno površino odlično zbiral svetlobo za kote od  $-3^\circ$  do  $+54^\circ$ , vodnik ki bi imel še odbojne stranice pa bi dobro zbiral svetlobo v še večjem intervalu vpadnih kotov. S takšnim vodnikom bi celoto površino detektorja svetlobe Čerenkova lahko pokrili tako, da bi bil vodnik v vsakem kvadrantu zasukan za  $90^\circ$  v osi X (slika 34(a)).

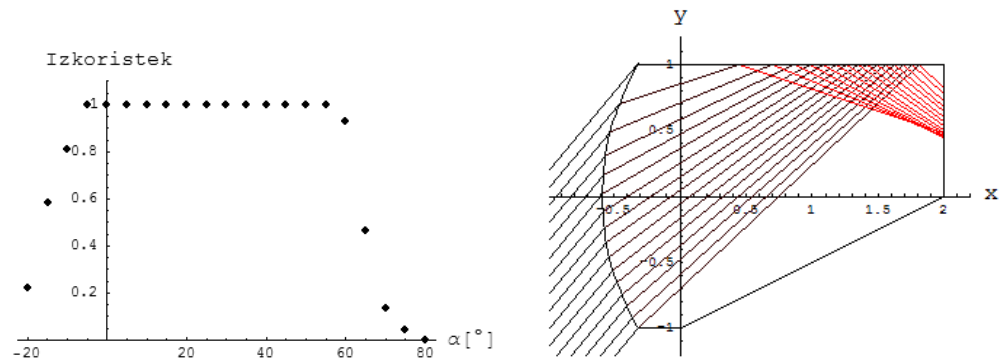
Vendar so zgornje ocene narejene v primeru, ko prihaja svetloba pod kotom le v ravnini X-Y, v ravnini X-Z pa vpada pravokotno. Če upoštevamo vse možne vpadne kote svetlobe Čerenkova za vodnike na različnih položajih na površini detektorja, se izkaže, da se blizu meje med kvadranti veliko svetlobe izgubi zaradi večkratnih odbojev v vogalih vodnika (slika 34(a)). Boljši izkoristek bi lahko dosegli, če bi površino med kvadranti pokrili z vodnikom, ki je nesimetričen v obeh oseh (slika 33). Pri takem vodniku bi svetloba dosegla zadnjo površino z manj odboji, zato bi izkoristek ostal sprejemljiv na vsej površini detektorja (slika 34(b)).

Pokazal sem, da z vodniki lahko zberemo svetlobo za precejšnje intervale vpadnih kotov in tako razširimo uporabnost silicijevih fotopomnoževalk. Svetlobni vodniki so zelo prilagodljivi, z različnimi geometrijami vodnikov in njihovo razporeditvijo po površini, na kateri želimo zaznavati svetlobo, lahko dosežemo skoraj popoln izkoristek z več tipi vodnikov ali pa se zadovoljimo s še zadovoljivim izkoristkom s preprostimi vodniki (z ravno vstopno površino).

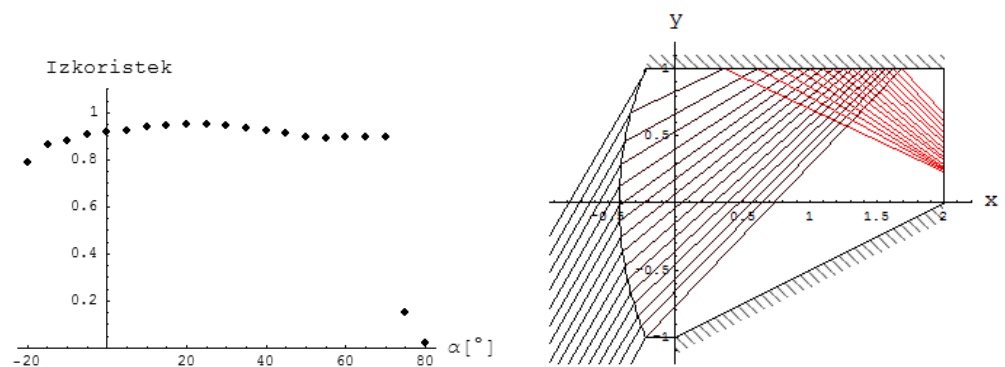




(a) Vodnik z ravno vstopno površino

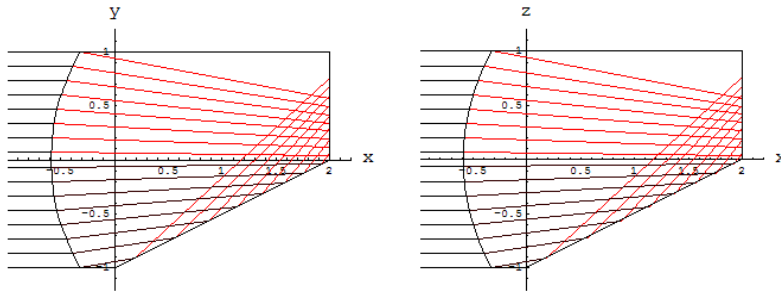


(b) Vodnik z ukrivljeno površino

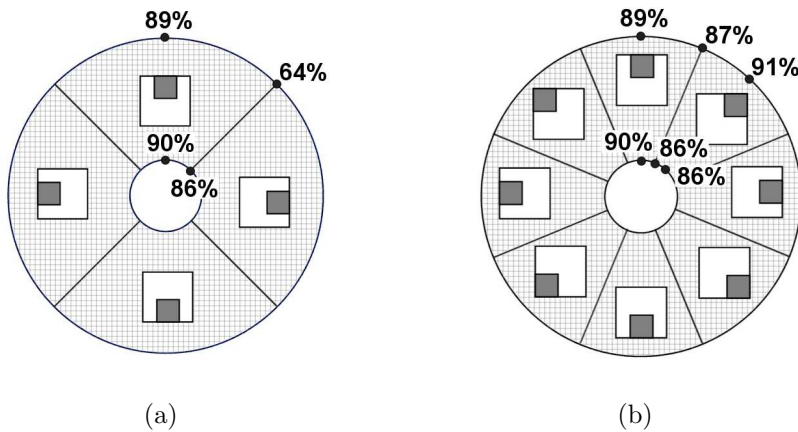


(c) Vodnik z ukrivljeno površino in odbojnimi ploskvami

Slika 32: Izkoristki zbiranja svetlobe v odvisnosti od vpadnega kota za tri tipe nesimetričnih vodnikov.



Slika 33: Vodnik, ki je nesimetričen v obeh oseh.



Slika 34: Pokritje z (a) enim tipom vodnika; (b) dvema tipoma vodnika. Na robovih so označeni najmanjši izkoristki v primeru vodnika z ukrivljeno površino in odbojnimi stranicami.

V načrtovani nadgradnji detektorja Belle bi lahko z dobrim izkoristkom zbirali svetlobo s samo dvema tipoma vodnikov z lečo in odbojnimi stranicami, z razmerjem med površino vstopne in zbiralne ploskve  $M = 4$ .

Na silicijevi fotopomnoževalki s površino  $1 \times 1$  mm bi torej lahko uporabili svetlobni vodnik s površino  $4 \text{ mm}^2$ . V načrtovanem detektorju obroček Čerenkova bi bila na ravnini fotonjskih detektorjev površina obroča svetlobe Čerenkova  $\approx 46 \text{ cm}^2$ . Obroč bi tako pokrival približno:

$$N_{det} = \frac{46 \text{ cm}^2}{4 \text{ mm}^2} \approx 1200$$

detektorjev. Če bi se pri meritvah omejili na časovno okno dolžine  $t = 10$  ns, bi bilo število šumnih sunkov v obroču za detektorje s pogostnostjo temnega šuma  $\nu_{sum} = 1$  MHz enako:

$$N_{sum} = N_{det} \cdot \nu_{sum} \cdot t \approx 12$$

Fluktuacija števila šumnih sunkov v obroču je tako:

$$\sqrt{N_{\text{sum}}} \approx 3$$

kar je mnogo manj od povprečnega števila fotonov v obroču  $N_{\text{fot}} \approx 25$ .

Odlična časovna ločljivost silicijevih fotopomnoževalk nam torej omogoča, da se pri meritvah omejimo na kratko časovno okno dolžine okrog 10 ns in tako dosežemo zelo dobro učinkovitost ločevanja fotonov od ozadja.



## 6 Zaključek

V diplomskem delu sem meril odziv silicijevih fotopomnoževalk na osvetlitev s pulzi svetlobe, ki jih je sestavljalo le nekaj fotonov. Signali iz silicijeve fotopomnoževalke, ki ustrezajo različnemu številu zaznanih fotonov, se po velikosti med seboj dobro ločijo. Nekaj mV visok signal, ki ga povzroči že en sam piksel, lahko brez težav izmerimo. Časovna ločljivost reda 100 ps nam omogoča, da se pri meritvah omejimo na časovno okno le nekaj ns in tako zmanjšamo verjetnost, da zaznamo šumni sunek na dovolj nizko raven. Na ta način lahko silicijeve fotopomnoževalke uporabljamo za zaznavanje posameznih fotonov tudi pri sobni temperaturi.

Meritve površinske občutljivosti so pokazale, da je odziv različnih pikslov na detektorju zelo enakomeren. Izmeril sem, kako zgradba silicijeve fotopomnoževalke vpliva na geometrijski izkoristek detektorja. Silicijeve fotopomnoževalke z velikimi piksli (npr. Hamamatsu H100C) lahko ravno zaradi dobrega geometrijskega izkoristka dosežejo učinkovitost zaznavanja fotonov nad 60%.

Pokazal sem tudi, da s svetlobnimi vodniki lahko z dovolj dobrim izkoristkom zbiramo svetlobo pod vpadnimi koti, kakršne pričakujemo v detektorju obročev Čerenkova v načrtovani nadgradnji spektrometra Belle. S svetlobnimi vodniki bi površino silicijevih fotopomnoževalk efektivno povečali vsaj za faktor 4. Če bi bili pripravljene celotno površino pokriti na bolj zapleten način, z več optimiziranimi tipi vodnikov, pa bi lahko ta faktor še povečali. Na ta način bi lahko zmanjšali število potrebnih detektorjev in temni šum na celotni površini.

Silicijeva fotopomnoževalka je tako resni kandidat za zaznavanje fotonov v detektorjih obročev Čerenkova. Ob nekaterih očitnih prednostih pred ostalimi detektorji svetlobe (kompaktnost, enostavno napajanje, neobčutljivost na visoka magnetna polja) pričujoče meritve kažejo, da tudi edina velika slabost, znaten temni šum, ne predstavlja večje ovire.



## 7 Literatura

- [1] A. Abashian, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 479 (2002) 117.
- [2] Hamamatsu MPPC Multi-Pixel Photon Counter, Catalog January 2007
- [3] P. Buzhan, et al., ICFA Instrum. Bull. 23 (2001) 28.
- [4] B. Dolgoshein, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 563 (2006) 368.
- [5] D. Renker, Nucl. Instr. and Meth. A 567 (2006) 48.





UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

## IZJAVA

Podpisani Rok Dolenc, roj. 5.4.1982, študent Fakultete za Matematiko in Fiziko Univerze v Ljubljani, naravoslovna smer, izjavljam, da je diplomsko delo z naslovom

### **Detekcija posameznih fotonov s silicijevo fotopomnoževalko**

pri mentorju doc. dr. Samo Korparju, avtorsko delo. V diplomskem delu so uporabljeni viri in literatura korektno navedeni; teksti niso prepisani brez navedbe avtorjev.

(podpis študenta/-ke)

Ljubljana, 2007