

# PRAKTIKUM IZ MODERNE FIZIKE

## Silicijski fotomultiplikator

M. Makek  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Fizički odsjek

Zagreb, 2020.

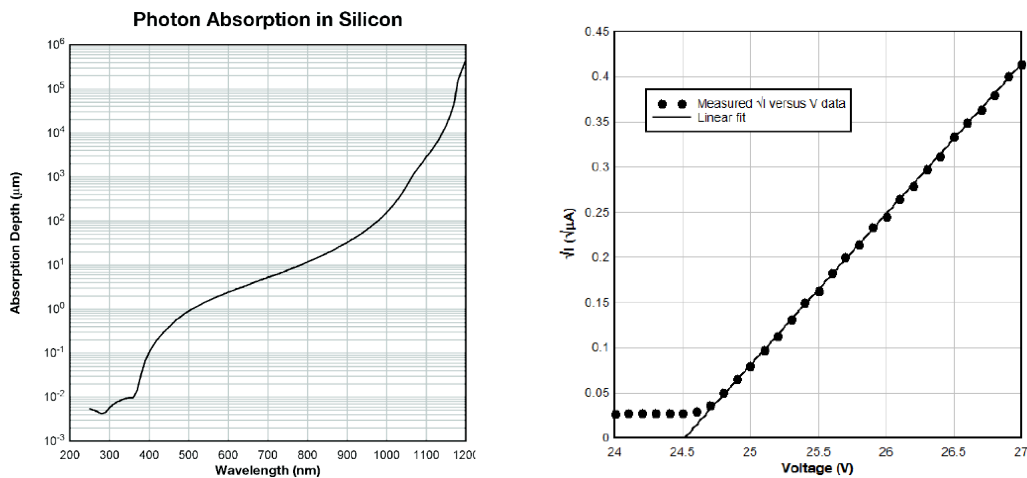
# 1 Uvod

Silicijski fotomultiplikator (engl. Silicon Photomultiplier - SiPM) je kompaktan poluvodički uređaj, koji može opažati pojedinačne kvante svjetla - fotone. Kao detektori svjetlosti silicijski fotomultiplikatori u široj su upotrebi posljednjih desetak godina, a novi modeli poboljšanih karakteristika i dalje se neprestano razvijaju. Silicijski fotomultiplikatori nalaze primjene kao detektori za izravno opažanje svjetlosti (npr. LIDAR-Light Detection and Ranging), ali i za detekciju ionizirajućeg zračenja u kombinaciji sa scintilacijskim kristalima (materijali koji svjetlucaju pri interakciji sa energetskom nabijenom česticom ili gama fotonom). U posljednjem primjeru silicijski fotomultiplikatori opažaju svjetlost koja se u scintilatorima stvara pri interakciji sa ionizirajućom česticom, a obzirom da jačina svjetlosnog bljeska odgovara deponiranoj energiji, SiPM može posredno mjeriti i energiju, stoga je primjena SiPM česta u eksperimentima u nuklearnoj fizici, ali i u nuklearnoj medicini gdje se koriste u dijagnostičkim uređajima poput detektora za pozitronsku emisijsku tomografiju (PET) i gama kamerama. Cilj je ove vježbe upoznati studente sa principom rada silicijskih fotomultiplikatora, ali i sa povezanim kvantnim fenomenima.

## 2 Princip rada silicijskog fotomultiplikatora

Silicijski fotomultiplikator sadrži velik broj ćelija - jednofotonskih lavinskih fotodioda (engl. Single Photon Avalanche Diode - SPAD) na zajedničkom silicijskom supstratu. Tipično SiPM ima 300-500 ćelija po  $\text{mm}^2$ , no ta gustoća može biti i veća, do  $10^4$  ćelija po  $\text{mm}^2$ . Silicij relativno dobro apsorbira svjetlost, a apsorpcijska dubina ovisi o valnoj duljini upadnog fotona (slika 1). Apsorpcija fotona uzrokuje pobudu elektrona iz valentne u vodljivu vrpcu, stvarajući par elektron-šupljna (e-h).

Svaka SPAD ćeliju je p-n spoj, na koji se stavlja reverzni napon, koji svira zonu osiromašenja bez slobodnih nosilaca naboja. Obizrom da je u zoni osiromašenja uspostavljeno električno polje, ono će ubrzati e-h par koji nastaje po apsorpciji fotona. Posebnost lavinskih fotodioda je da rade u Geigerovom načinu: reverzni napon je tako visok da ubrzava primarni elektron i šupljinu toliko da imaju energije izazvati sekundarnu ionizaciju. Taj proces se ponavlja i nastaje lavina, tj. Geigerov izboj. Efektivno, p-n spoj postaje vodljiv, a signal jednog e-h para se pojačava do makroskopske struje. Kako bi se izboj prekinuo, svaka SPAD ćelija ima serijski spojen prigušni otpornik (engl. quenching resistor). Kada struja kroz njega poteče ona uzrokuje pad napona, koji se odražava na pad reverznog napona ispod



Slika 1: Lijevo: ovisnost apsorpcijske dubine o valnoj duljini upadnog zračenja za silicij. Desno: ovisnost struje kroz p-n spoj o narinutom naponu.

granice proboja, čime se izboj zaustavlja i omogućuje se sljedeća detekcija. Pojedina SPAD ćelija može istovremeno opaziti samo jedan foton, tj. ne može detektirati intenzitet fotonskog snopa. No SiPM sadrži velik broj ćelija, koje će pri lavini dati podjednaku struju, njihov zbrojeni signal daje kvazi-analogni odgovor proporcionalan fotonskom fluksu. Više detalja o radu SiPM-a može se naći u [1].

### 3 Karakteristike silicijskog fotomultiplikatora

#### 3.1 Napon proboja

SiPM, ovisno o modelu, ima specifičan napon proboja  $U_{BD}$  (engl. breakdown voltage) - to je napon koji je dovoljan da se u SPAD ćeliji pokrene lavina koja će prouzročiti privremenu vodljivost p-n spoja i posljedično struju koja uzorkuje pad napona na veznom otporniku. Tipično su naponi proboja u području 30 – 70 V. Režim rada SiPM-a je obično u području  $U_{BD} + 1$  V -  $U_{BD} + 5$  V, pa kažemo da je SiPM u nadnaponu (engl. overvoltage),  $\Delta U = U - U_{BD}$ . Logično, napon proboja može se odrediti promatrajući pojavu signala iz detektora. No također se može odrediti i promatranjem reverzne struje, obzirom da pri proboju i nadnaponima detektor postaje “vodljiv“ pa struja raste s nadnaponom (Slika 1: desno).

## 3.2 Pojačanje

Pojačanje kod SiPM-a (engl. gain),  $G$ , definira se kao ukupni naboj stvoren u SPAD-u u odnosu na naboj jednog fotoelektrona:

$$G = \frac{C\Delta U}{e} \quad (1)$$

gdje je  $C$  kapacitet mikroćelije, a  $e$  je jedinični naboj.

## 3.3 Efikasnost detekcije fotona

Efikasnost detekcije fotona (engl. photon detection efficiency, PDE) je vjerojatnost da upadni foton rezultira signalom (lavinom) na pojedinom SPAD-u. Ova efikasnost je kompleksna veličina, koja ovisi o nekoliko faktora:

$$PDE(\lambda, U) = \eta(\lambda)\epsilon(U)F \quad (2)$$

gdje je  $U$  narinuti napon,  $\eta(\lambda)$  je kvantna efikasnost silicija koja ovisi o valnoj duljini upadnog fotona,  $\epsilon(U)$  je vjerojatnost stvaranja lavine, a  $F$  je faktor popunjenosti SiPM-a, koji se definira kao omjer fotoosjetljive i ukupne površine SiPM-a.

## 3.4 Tamni pogotci, okidanje susjednih ćelija i zakašnjele lavine

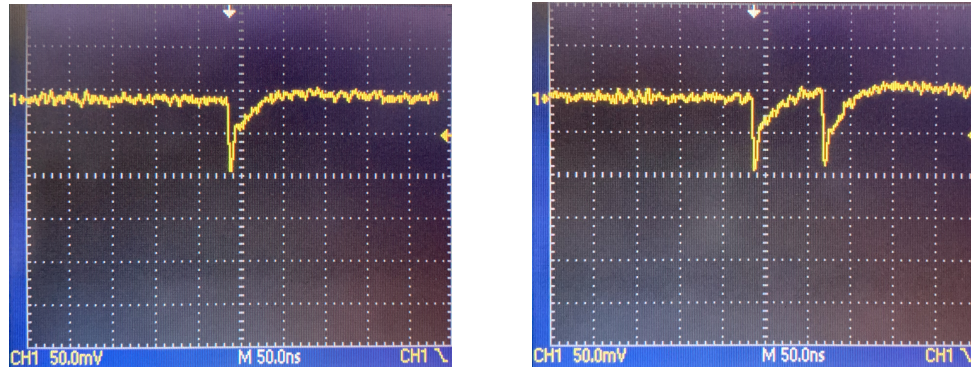
Tamni pogotci (engl. dark counts) su ćelije okinute zbog termički generiranih nosioca naboja (e-h parova) i čine glavni izvor šuma u silicijskim fotomultiplikatorima. Frekvencija tamnih pogodaka raste s temperaturom i narinutim naponom, a može se odrediti brojanjem pogodaka u odsustvu vanjskog svjetla, uz prag okidanja od 0.5 p.e.

Okidanje susjednih ćelija (engl. optical cross talk) uzrokovano je fotonima nastalima u lavini primarne ćelije, koji putuju kroz kristal i okidaju jednu od susjednih ili bliskih ćelija. Frekvencija okidanja susjednih ćelija može se procijeniti iz omjera frekvencija pogodaka u odsustvu svjetla pri pragu od 1.5 p.e. Vjerojatnost okidanja susjednih ćelija definira se kao:

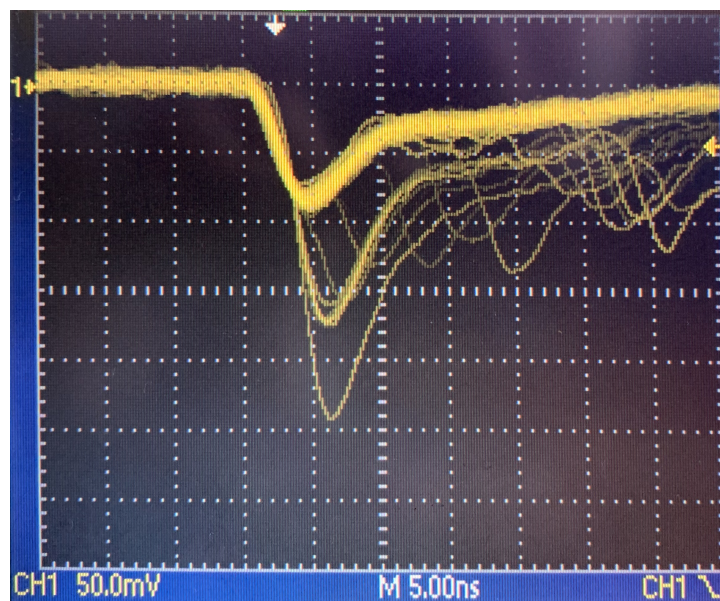
$$P_x = \frac{DCR_{1.5p.e.}}{DCR_{0.5p.e.}} \quad (3)$$

Oba spomenuta efekta rastu s nadnaponom. Osim njih, mogu nastati i zakašnjele lavine (engl. afterpulses) - zakašnjele okidanje ćelija nakon otpuštanja nosica zarobljenih u metastabilnim stanjima. Svi navedeni efekti su nepoželjni i kvare razlučivost sustava.

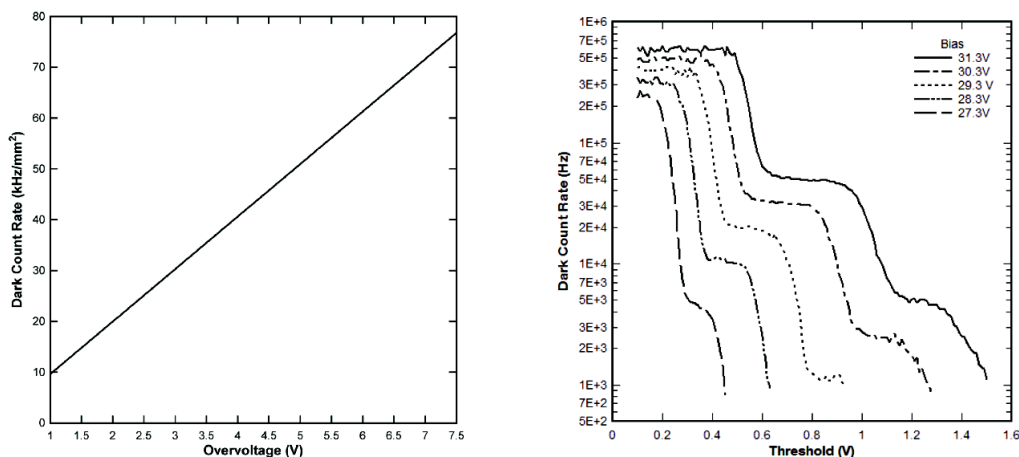




Slika 2: Lijevo: signal tamnog pogodaka, koji odgovara jednom fotoelektronu u jednoj mikroćeliji. Prag okidanja je na vrijednosti -20 mV, što odgovara polovici amplitude signala 1 p.e. Desno: signal tamnih pogodaka iz dvije mikroćelije u aktivirane u kratkom vremenskom razmaku.



Slika 3: Signali tamnih pogodaka, akumulirano za više događaja. Dominiraju signali gdje je opalila jedna mikroćelija, no prisutni su i signali dvostruke i trostruke amplitude, zbog efekta okidanja susjednih ćelija. Također se mogu uočiti i signali zakašnjelih okidanja, koji slijedi iza primarnog signala.



Slika 4: Ovisnost frekvencije tamnih pogodaka o nadnaponu (lijevo), ovisnost frekvencije tamnih pogodaka o pragu okidanja pri različitim nadnaponima (desno).

### 3.5 Saturacija signala

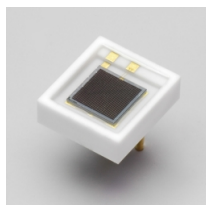
Još jedno svojstvo silicijskih fotomultiplikatora je saturacija signala - pri velikim svjetlosnim intenzitetima može se desiti da više svjetlosnih fotona upada na istu SPAD ćeliju, no ako je ona već u stanju lavine, fotoni koji na nju dolaze neće biti detektirani, stoga statistički dolazi do saturacije signala.

### 3.6 Statistika pogodaka

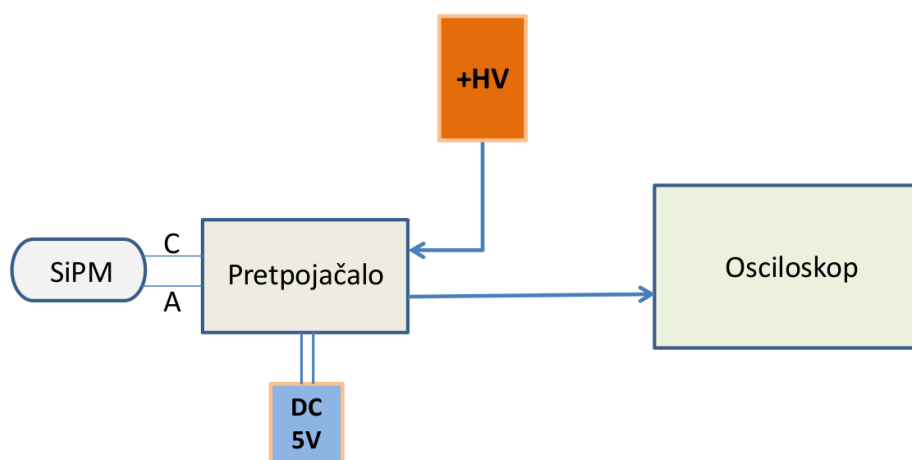
Pri zadanoj temperaturi i reverznom naponu te za danu frekvenciju upadnih fotona, SPAD ćelije imaju jednaku vjerojatnost okidanja. Isti je slučaj i u odsustvu upadne svjetlosti, pri danom naponu i temperaturi, sve SPAD ćelije će imati jednaku vjerojatnost okidanja. Ako se promatra konačni vremenski interval širine  $\Delta T$ , onda bi broj okinutih ćelija u tom intervalu,  $x$ , trebalo slijediti Poissonovu raspodjelu:

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (4)$$

gdje je  $\lambda$  očekivanje Poissonove raspodjele koje je u ovom slučaju dano umnoškom frekvencije pogodaka i širine intervala  $\lambda = \nu \Delta T$ .



Slika 5: Silicijski fotomultiplikator Hamamatsu S13360.



Slika 6: Shema eksperimentalnog postava.

## 4 Eksperimentalni postav

Eksperimentalni postav sastoji se od silicijskog fotomultiplikatora (Hamamatsu model S13360, Slika 4), pretpojačala, napajanja za pretpojačalo (5V DC), izvora napona na SiPM i digitalnog osciloskopa. SiPM koji se koristi u ovoj vježbi ima aktivnu površinu od 3 mm x 3 mm, koja sadrži 3600 mikroćelija, faktor popunjenosti je 74%, a tipični naponi proboja su oko 53 V [2]. SiPM zatvoren je u svjetlonepropusno kućište, te priključen na pretpojačalo. Pretpojačalo se napaja istosmjernim naponom od 5V, te osim priključka za SiPM ima priključak na koji se spaja napon reverzne polarizacije te signalni priključak (Slika 4).

## 5 Zadaci

1. Postavite eksperimentalni postav prema zadanoj shemi, a izlaz iz pretpojačala spojite na osciloskop. Ocijenite napon proboja tako da postepeno povećavate napon na SiPM u području 52.0 V - 54.0 V i promatrate na osciloskopu pojavu signala.
2. Postavite napon na detektoru na 3V iznad proboja. Na osciloskopu odredite amplitude signala koje odgovaraju 1, 2 i 3 okinute ćelije i iz toga odredite prosječnu amplitudu signala koji odgovara jednom fotoelektronu (p.e.) pri danom naponu i temperaturi.
3. Odredite ovisnost prosječne amplitude signala koji odgovara jednom fotoelektronu (p.e.) za  $\Delta U = 1, 2, 3, 4$  V.
4. Izmjerite frekvenciju tamnih pogodaka u ovisnosti u pragu okidanja na osciloskopu u koracima koji otprilike odgovaraju 1/10 p.e. za dani napon. Ponovite ovo mjerenje za napone  $\Delta U = 1, 2, 3, 4$  V.
5. Koristeći podatke dobivene pod 4), odredite vjerojatnost okidanja susjednih ćelija pri danoj temperaturi za napone  $\Delta U = 1, 2, 3, 4$  V.
6. Provjerite statistiku tamnih pogodaka u prozoru širine  $\Delta T = 1 \mu s$ . Postavite vremensku skalu na osciloskopu tako da dobijete zadanu širinu prozora. Okidanje na kanal na kojem nema signala. Koristite "Force trigger" tipku da snimate nasumični vremenski prozor. Očitajte broj dogođaja u 500 vremenskih prozora. Usporedite rezultate s Poissonovom raspodjelom, provedite  $\chi^2$ -test i komentirajte.

## Literatura

- [1] An Introduction to the Silicon Photomultiplier  
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9770-D.PDF>
- [2] [https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360\\_series\\_kapd1052e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf)