

Površinska raspodjela učinkovitosti detekcije malog broja fotona kod dioda s lavinskom multiplikacijom

Marijan Matković

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Bijenička 32, 10000 Zagreb, 20.siječnja 2025.

Mentor: dr. sc. Tihomir Knežević

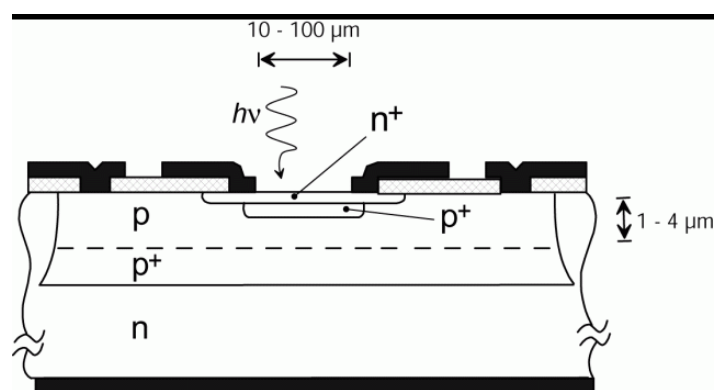
Institut Ruđer Bošković, Bijenička 54, 10000 Zagreb

Silicijske poluvodičke diode za detekciju jednog fotona temeljene na lavinskoj multiplikaciji (engl. *single photon avalanche diode* - SPAD) imaju mogućnost rada u režimu svjetlosne emisije i detekcije svjetlosti vrlo niskog intenziteta. SPAD-ovi su stoga privlačni za korištenje u optičkoj komunikaciji, sustavima za 3D detekciju kao i naprednim primjenama poput optičkih neuronskih mreža gdje mogu sudjelovati u prijenosu i pohrani informacija. Cilj seminarskog projekta su optoelektrička mjerenja poluvodičkih dioda sa slojevima amornog bora pri čemu će se istražiti utjecaj defekata na povećanje svjetlosne emisije. Izmjerit će se strujno-naponske karakteristike dioda s i bez defekata te će se *knife-edge* metodom optimizirati širina laserskog snopa. Na istim diodama provest će se karakterizacija površinske raspodjele detekcije fotona.

1. UVOD

Jednofotonske lavinske diode (SPAD) su vrlo osjetljivi poluvodički elementi koji mogu detektirati pojedinačne fotone. Ove diode rade u Geigerovom režimu, što im omogućuje izuzetno visoku osjetljivost i preciznost u mjerenju vremena dolaska svjetlosti. Princip rada SPAD-ova je takav da se polariziraju iznad napona proboja (tzv. *Geigerov režim*). U ovom stanju čak i jedan foton može uzrokovati lavinsku multiplikaciju elektrona i šupljina, stvarajući velik električni impuls. Nadalje, kada foton pogodi aktivno područje diode, stvara se par elektron-šupljina koji se ubrzava u snažnom električnom polju i pokreće lavinsku reakciju koja umnaža signal. Lavina se mora zaustaviti kako bi dioda bila spremna za detekciju sljedećeg fotona. To se postiže pomoću gašenja napona (*quenching*). Smanjenjem napona ispod razine proboja dolazi do gašenja lavine. SPAD-ovi mogu detektirati pojedinačne fotone. Imaju preciznost u rasponu pikosekundi u vremenu detekcije fotona. Lavinski proces postiže veliko unutarnje pojačanje što olakšava detektiranje i jako slabih signala. Zbog toplinski generiranih nositelja naboja nastaje šum (*DCR* – *dark count rate*). Nakonprobojni impulsi (*afterpulsing*) uzrokuju lažna očitavanja nakon početka lavine. Neželjeni efekt je i optičko preslušavanje (*optical crosstalk*). To je

neželjena interakcija prijenosa svjetlosnih signala između susjednih optičkih elemenata ili komponenti. Do tog efekta dolazi kada svjetlost, koja bi trebala ostati unutar određenog područja, „procuri“ u susjedna područja, uzrokujući generaciju neželjenih impulsa. Glavni uzroci toga su raspršenje, refleksija ili difuzija fotona. Moguće ih je spriječiti boljom izolacijom između susjednih elemenata.



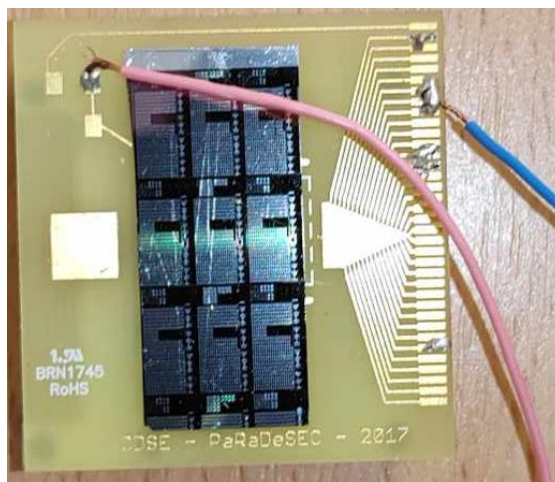
Slika 1 Ilustracija strukture SPAD-a

2. TEORIJSKA RAZMATRANJA

a. Opis rada SPAD-a

Kada foton prolazi kroz silicij može se apsorbirati i prenijeti energiju vezanom elektronu. Zbog apsorbirane energije elektron prijeđe iz valentne u vodljivu vrpču, stvarajući par elektron-šupljina. Fotodioda se formira silicijskim p-n spojem koji stvara osiromašeno područje oslobođeno mobilnih nositelja naboja. Primjenom reverznog napona na fotodiodu stvara se električno polje kroz osiromašeno područje koje ubrzava nositelje naboja prema anodi (šupljine) ili katodi (elektrone). Sveukupno će apsorbirani foton rezultirati neto protokom struje u fotodiodi. Kada se unutar osiromašenog područja generira dovoljno jako električno polje, nositelj naboja stvoren tamo bit će ubrzan do točke gdje nosi dovoljno kinetičke energije da stvori sekundarne parove naboja u procesu udarne ionizacije (*impact ionization*). Na taj način jedan apsorbirani foton pokrene samoodrživu lavinu ionizacije koja se širi kroz silicij pod električnim poljem. Dolazi do proboja, pojačavajući izvorni par elektron-šupljina u makroskopsku struju. Fotodioda koja radi u Geigerovom režimu koristi mehanizam lavinske multiplikacije za postizanje visokog pojačanja i naziva se *SPAD* (jednofotonska lavinska dioda). Primjena reverznog napona iznad napona proboja stvara potrebne gradijente polja kroz spoj. Kada struja počne teći, mora se zaustaviti, to jest „gasiti“. Pasivno gašenje postiže se korištenjem serijskog otpornika, koji ograničava struju koju dioda prima tijekom proboja. Otpornik smanjuje reverzni napon koji dioda vidi na napon manji od probojnog. Posljedica toga je zaustavljanje lavine. Na taj način SPAD senzor koji radi u Geigerovom režimu može funkcionirati kao prekidač aktiviran fotonom, u stanju „uključeno“ ili „isključeno“. Bez obzira na broj fotona apsorbiranih u isto vrijeme, ona će proizvesti signal jednak onome jednog fotona. Apsorpcija fotona nije jedini događaj koji može pokrenuti lavinsku struju u SPAD-u. Lažni događaji mogu se primijetiti i kada se SPAD drži u potpunom mraku. Prosječan broj tamnih impulsa po jedinici vremena naziva se *DCR* (*dark count rate*). Nositelji naboja mogu biti toplinsko generirani. Toplina pobudi elektrone iz valentne vrpce u vodljivu vrpču, stvarajući parove elektron-šupljina i oponašajući događaj apsorpcije fotona. Druga vrsta lažnih događaja nastaje zbog nesavršenosti u kristalnoj rešetki poluvodiča. Nesavršenosti stvaraju lokalizirana energetska stanja unutar zabranjenog pojasa te nositelji, zarobljeni u tim stanjima, mogu tunelirati u vodljivu vrpču zbog jakog električnog polja, pokrećući lavinu. Također je moguće i spontano tuneliranje između vrpci pri jakim električnim poljima. Nakon detekcije događaja, nositelji naboja mogu biti zarobljeni u defektnim stanjima i

kasnije se osloboditi. Kada se oslobode, ti nositelji mogu pokrenuti lavinu. Osim DCR, još je bitno spomenuti fenomen *afterpulsing*. Nakon detektiranja nosioci mogu biti zarobljeni u defektnom stanju te kasnije izaći iz njega pokrećući lavinu.



Slika 2 Ploča sa SPAD elementima

b. Strujno-naponska karakteristika

Strujno-naponska karakteristika opisuje odnos između struje i napona kroz element. Za općenitu je diodu ona nelinearnog oblika. Struja teče samo kada je dioda polarizirana u propusnom smjeru, a blokira struju u zapornom smjeru. Za zaporni smjer je struja vrlo mala dok se ne postigne „probojni napon“. Za zaporno polariziranu fotodiodu, poput SPAD-a, struja postaje ovisna o upadnoj svjetlosti. Bez svjetlosti je struja mala i odgovara tamnoj struji (*dark current*). U prisustvu svjetla struja raste proporcionalno intenzitetu svjetla. Za SPAD koji radi u Geiger modu struja je zanemariva pri niskom naponu. Ako je napon iznad probojnog napona, struja naglo raste zbog lavinske multiplikacije. Kada se primijeni odgovarajući sklop za smanjivanje prenapona (*quenching circuit*), element se može resetirati u stanje prije proboja.

c. Knife-edge metoda

Knife-edge metoda koristi se za mjerenje prostornog profila laserske zrake. Laserski snop presijeca „oštricom“ te se snaga odrezanog dijela snopa mjeri kao funkcija položaja „oštrice“. Dobivena krivulja predstavlja integral rubne distribucije, pri čemu započinje s ukupnom snagom snopa i opada do nule. Širina snopa se definira kao udaljenost između točaka na dobivenoj krivulji koje su arbitrarno na 10% i 90% (ili 20% i 80%) od maksimalne vrijednosti. Širina snopa dobivena *knife edge* metodom uvijek odgovara 60% (u slučaju 20/80) ili 80% u slučaju (10/90) ukupne snage

snopa. Ovdje su u mjerenjima arbitrarno stavljene točke na 16% i 84% intenziteta. Funkcija intenziteta je oblika:

$$P = \frac{P_0}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right) + C ,$$

gdje je *erf* Gauss error funkcija, σ brzina prijelaza između niskih i visokih vrijednosti sigmoidne funkcije, x stvarna pozicija senzora duž smjera u kojem mjerimo intenzitet snopa, x_0 je središnja pozicija snopa, a C je konstanta.

Ciljanjem lasera na diodu te prelaskom preko ruba diode mjeri se promjena u intenzitetu laserskog svjetla koja dolazi do detektora. Uz pomoć *knife-edge* metode odredila se širina laserske zrake koja će kasnije poslužiti za skeniranje po diodi i određivanje površinske raspodjele struje na diodi.

d. Površinska raspodjela detekcije fotona

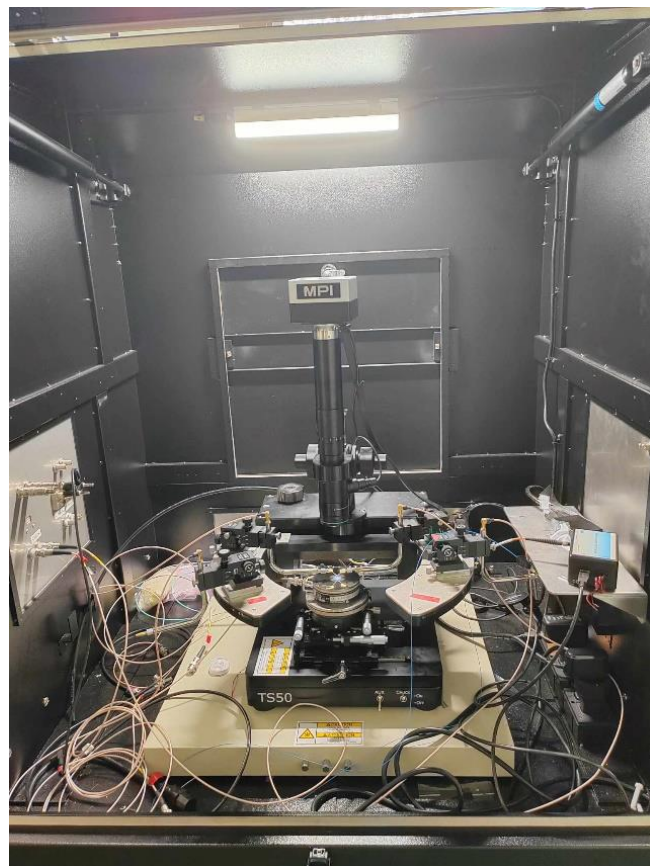
Korištenjem *knife-edge* metode iterativnim postupkom laser se usklađuje na što manju širinu snopa. Prelaskom lasera preko cijele diode te preko rubova diode promatramo površinsku raspodjelu jakosti struje. Uspoređujemo dobivene toplinske karte za različite napone te razlike u površinskim raspodjelama između defektne diode i nedefektne diode.

3. MJERNI POSTAV

Korištena su dva mjerna postava za SPAD-ove: sondna stanica i laserski postav.

a. Sondna stanica

Sondna stanica s računalom na kojem su se mjerile strujno-naponske karakteristike SPAD-ova. Mjerenje se provodi tako da se željena dioda spoji u strujni krug na sondnoj stanici te se pušta određeni raspon napona i bilježi ponašanje struje.



Slika 3 Sondna stanica

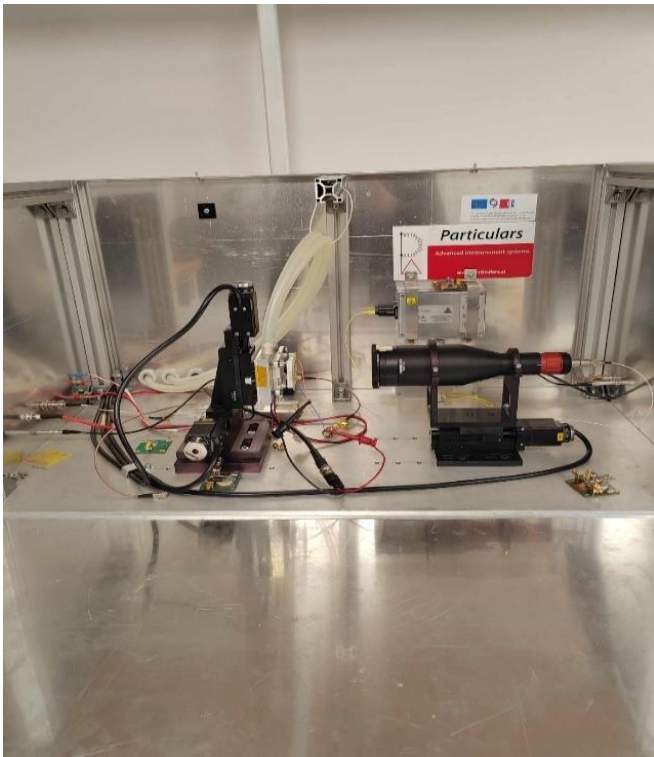
b. Laserski postav

Drugi postav je postav za *knife-edge* metodu se sastoji od lasera, čija svjetlost prolazi kroz *beam expander* (Thorlabs GBE 15-B), kolimator, dvije leće te rožnicu (SM2D25D). Rožnica se koristi za određivanje udjela laserske svjetlosti koja izlazi, a kolimator je uređaj koji sužava snop čestica te usmjeruje kretanje čestica snopa u određenom smjeru. Postavke kolimatora i rožnice su iterativnim postupkom mijenjane tako da se laserski snop optimizira u što manju širinu. Kompjuterskim programom se u iterativnom postupku mijenjala udaljenost diode i lasera tako da laser bude što bolje fokusiran na mjestu gdje se nalazi dioda. Postolje i laser povezani su računalom. Računalom su se postolje i udaljenost lasera od postolja mogli kontrolirati s 0.1 mikrometarskom preciznošću. Korišten je Keithley Model 2410 1100V SourceMeter za mjerenje struje koja prolazi diodom te se njime može dati reverzni napon

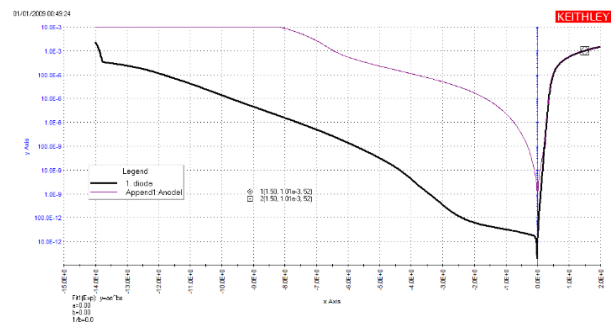
diodi. Na tom istom postavu odradila su se i mjerenja površinske raspodjele.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

a. Strujno-naponska karakteristika



Slika 4 Laserski postav

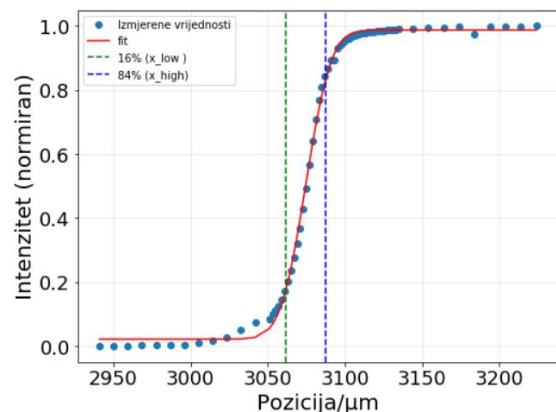


Graf 1 Strujno-naponska karakteristika defektne i nedefektne diode

Defektna dioda predstavljena je svjetlijom linijom, dok je nedefektna crnom. Vidimo na Grafu 1 da je krivulja nelinearnog oblika. U propusnom smjeru struja eksponencijalno raste. Uočava se razlika između defektne i nedefektne diode. Stopa rasta struje s porastom apsolutne vrijednosti napona znatno je veća kod defektne diode nego kod nedefektne.

b. Knife-edge metoda

Iterativnim postupkom optimiziranja kolimatora, rožnice te udaljenosti lasera od diode pokušala se dobiti što manja širina snopa laserske svjetlosti. Teorijsko predviđanje karakteristika postava je da bi se u najboljem slučaju širina snopa mogla smanjiti na $10\mu\text{m}$.

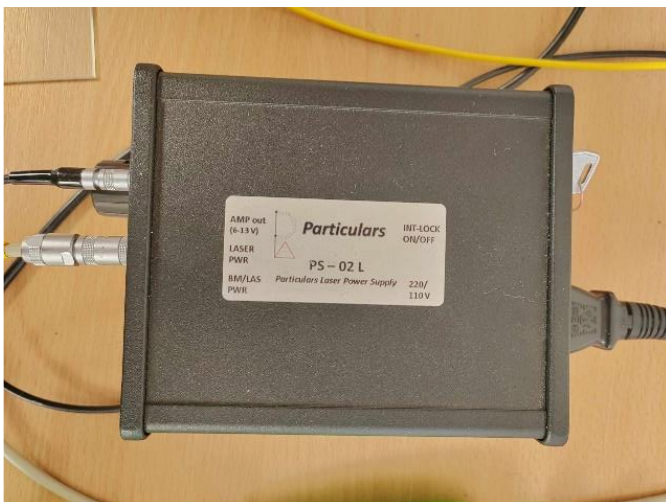


Graf 2 Ovisnost intenziteta o poziciji laserskog snopa na diodi

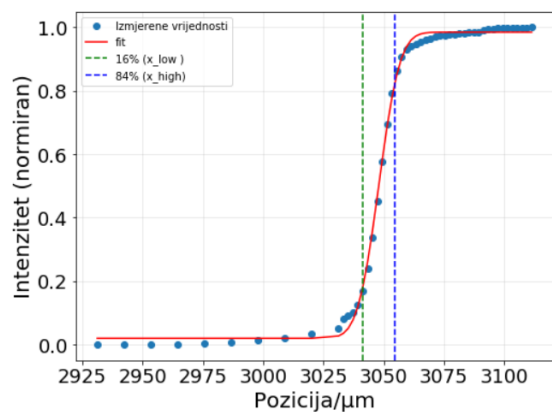
Dobiven je sljedeći rezultat:

$$d = (26 \pm 0.3) \mu\text{m}, R=1.15\%,$$

gdje d označava širinu snopa. Graf 2 prikazuje jedno od ranijih mjerenja. Daljnjim iterativnim postupkom došlo se do optimiziranih postavki kao što vidimo na Grafu 3.



Slika 5 Naponski izvor lasera



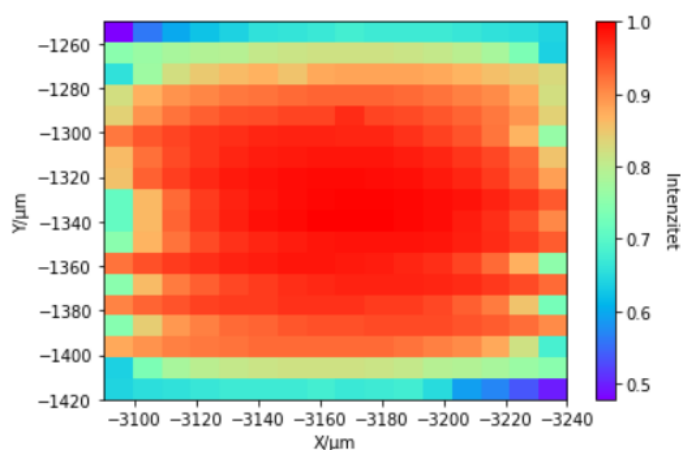
Graf 3 Zadnja iteracija knife-edge metode

$d = (13.7 \pm 0.2) \mu\text{m}$, $R=1.45\%$,

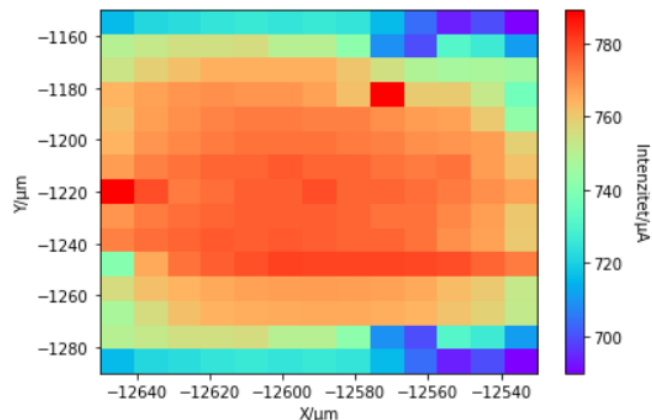
gdje je d širina snopa. Graf 3 je zadnje mjerenje iterativnog postupka gdje su pomaci među mjerenjima bili 10 mikrona te su smanjeni na 2 mikrona kada smo se nalazili na rubu diode tako da preciznost mjerenja bude što veća. Da bi se dobio najuži mogući laserski snop zadan teorijskom vrijednošću, koristeći zadani mjerni postav, trebalo bi imati osjetljivije uređaje za mjerenje. Dodatnim sužavanjem rožnice snop bi trebao postati još už, no i intenzitet znatno manji. Daljnja optimizacija postava nije bila moguća zbog relativno malog intenziteta u odnosu na šum i tamnu struju. Nakon što je širina laserskog snopa optimizirana, uslijedilo je mjerenje površinske raspodjele struje kada laserska svjetlost skenira preko cijele diode.

c. Površinska raspodjela detekcije fotona

Koristeći laserski snop širine $d = (13.7 \pm 0.2) \mu\text{m}$ skenirali smo površinu dioda te mjerili raspodjelu jačine struje

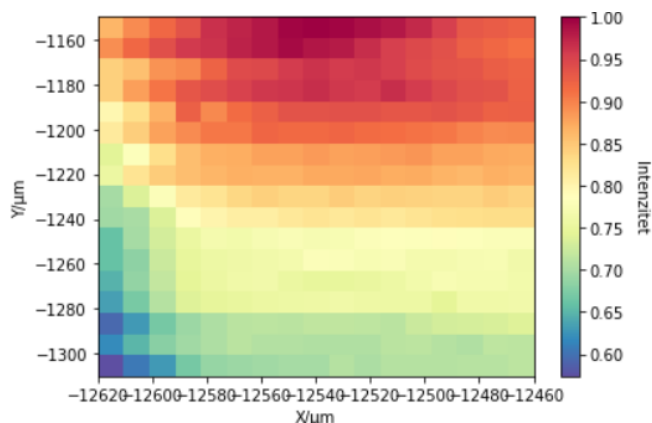


Graf 4 Toplinska karta nedefektne diode pri 0V



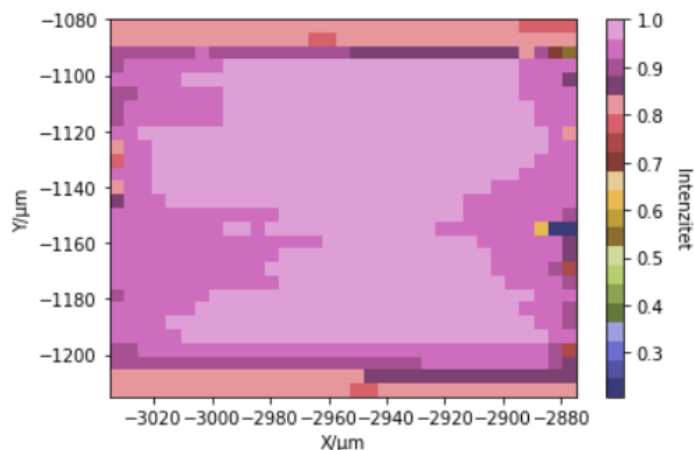
Graf 5 Toplinska karta defektne diode pri 0V

Na Grafovima 4 i 5 vidimo mjerenja gdje su pomaci bili 10 μm između mjerenja. Skenirane su površine defektne i nedefektne diode te oko njih. Uočava se uniformnija raspodjela intenziteta po nedefektnoj diodi, dok je raspodjela varijabilna za defektnu diodu. Manja osjetljivost po nasuprotnim rubovima koja se vidi na Grafu 4 mogla bi ukazivati na blagu nagnutost diode pri mjerenjima. Mjerni postav nije automatiziran te su ta odstupanja sustavne pogreške.



Graf 6 Toplinska karta defektne diode pri -2V

Na Grafu 6 vidimo defektnu diodu mjerenu od njezine polovice, preko ruba i ispod nje. Mjerena je pri -2V jer struja naglo poraste, što se vidi na Grafu 1 strujno-naponske karakteristike. Vidi se da je jedan dio površine znatno drugačiji, što bi moglo ukazivati na to da defekti uzrokuju povećanu multiplikaciju. Mjerenja iznad -2V nisu bila moguća zbog odlaska ampermetra u compliance, to jest, zbog prevelike struje.



Graf 7 Toplinska karta nedefektne diode pri -5V

Na Grafu 7 pomaci su $5\ \mu\text{m}$ te se najdetaljnije može vidjeti kako koji dijelovi diode imaju različite razine osjetljivosti.

Pokušana su i mjerenja pri -10V na nedefektnoj diodi. Zbog previsoke struje, a premale relativne promjene s prolaskom laserske svjetlosti po diodi te prevelikog šuma, nije bilo moguće dobiti jasne rezultate. Šum je proporcionalno rastao s apsolutnom vrijednošću reverznog napona te su promjene u struji zbog pomaka lasera imale veću nepouzdanost od prihvatljive na tim mjerenjima.

5. ZAKLJUČAK

U ovom su radu analizirani defektni i nedefektni SPAD-ovi. Analiza strujno-naponske karakteristike slaže se s teorijskim predviđanjima u potpunosti. Korištena je *knife-edge* metoda za mjerenje širine laserskog snopa te je iterativnim postupkom provedena optimizacija postava. Proučavanjem površinske raspodjele detekcije fotona uočavamo razlike između defektne i nedefektne diode. Nedefektna dioda ima uniformnu raspodjelu. Raspodjela na defektnoj diodi je neuniformna te je jedan dio površine znatno drugačiji, što može značiti da defekti pojačavaju multiplikaciju. Za preciznije rezultate potrebno je minimizirati šum, na primjer, korištenjem preciznijih uređaja, također otkriven je kabel koji je uzrokovao dodatan šum na mjerenjima Grafa 7. Bolja rezolucija mjerenja postigla bi se da je pomak između mjerenja manji. To bi zahtijevalo automatiziranje postava ili dulje trajanje mjerenja.

6. ZAHVALE

Ovaj rad izrađen je u Laboratoriju za poluvodiče na Institutu Ruđer Bošković pod vodstvom dr. sc. Tihomira Kneževića. Zahvaljujem mentoru na pomoći i savjetima.

7. LITERATURA

Ceccarelli, F., Acconcia, G., Gulinatti, A., Ghioni, M., Rech, I., & Osellame, R. (2021). Recent Advances and Future Perspectives of Single-Photon Avalanche Diodes for Quantum Photonics Applications. *Advanced Quantum Technologies*, 4, 1-24. <https://doi.org/10.1002/qute.202000102>.

Introduction to the Silicon Photomultiplier (SiPM). (2021). *Onsemi*, 8, 1-12.

Krakers, M., Knežević, T., Batenburg, K. M., Liu, X., Nanver, L. K. (2020). Diode Design for Studying Material Defect Distributions with Avalanche-Mode Light Emission. *2020 IEEE 33rd International Conference on Microelectronic Test Structures, ICMTS 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICMTS48187.2020.9107933>.

Krakers, M., Knežević, T., & Nanver, L. K. (2019). Reverse Breakdown and Light-Emission Patterns Studied in Si PureB SPADs. *MIPRO 2019*, 30-35. <https://doi.org/10.23919/mipro.2019.8757007>.

Nanver, L., & Knežević, T. (2023). Optical Detectors. U A. Chen (Ed.), *Advances in Semiconductor Technologies: Selected Topics Beyond Conventional CMOS* (pp. 211-229). Wiley-IEEE Press.

Rashad, M. M. (2020). *Measurements of Laser Beam Using Knife Edge Technique*. [Diplomski rad, Milansko politehničko sveučilište]. POLITesi. <https://www.politesi.polimi.it/retrieve/b0b19da2-0788-434f-8313-4264bffda739/la%20tesina%20revised-converted.pdf>.