

# Karakterizacija *Single-Photon Avalanche* Dioda (*SPADs*)

Matej Peranić  
Institut Ruđer Bošković  
Laboratorij za fotoniku i kvantnu optiku  
Bijenička cesta 54, 10000 Zagreb  
Mentor: dr.sc. Mario Stipčević

## Sažetak

U ovom seminarskom radu smo proučavali *Single-Photon Avalanche* diode (*SPAD*) koje se u kvantnoj optici koriste kao sastavni dio generatora nasumičnih događaja. Izmjerali smo šum (engl. *dark counts*), razlučivost (engl. *jitter*) te ovisnost frekvencije o naponu iz čega smo izračunali granični napon.

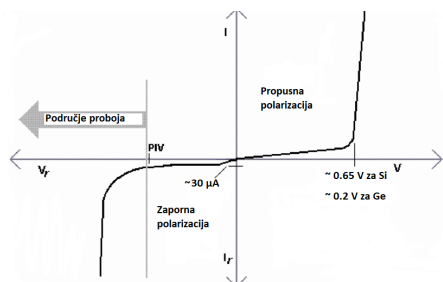
## Teorijski uvod

Dioda je poluvodički element koji se temelji na pn-spoju. Kod pn-dioda struja teče u ovisnosti o nametnutom naponu - ako je napon priključen tako da je negativan pol izvora na katodi, a pozitivan na anodi, dioda je propusno polazirana i vodi struju. Uz suprotan polaritet napona dioda neće voditi struju, tj. kroz diodu će teći mala reverzna struja zasićenja. Ovisnost struje diode o nametnutom naponu se naziva strujno-naponskom karakteristikom (I-V karakteristikom) i opisana je Shockleyevom jednadžbom:

$$I_D = I_S \left( \exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

pri čemu je  $U_D$  napon između anode i katode,  $U_T$  naponski ekvivalent temperature definiran kao  $U_T = kT/q$ ,  $I_S$  struja zasićenja, a  $I_D$  struja koja teče od katode prema anodi. Na slici 1. vide se tri karakteristična područja - područje zapiranja, područje vođenja i područje proboja. Ukoliko u području vođenja povećamo napon

iznad napona uključenja diode, ona naglo počne voditi struju. S druge strane, ako na pn-spoj priključimo vanjski napon takav da je anoda spojena na niži potencijal od katode, poteći će vrlo mala struja manjinskih nosilaca koja se neće mijenjati sa naponom (struja zasićenja). Porastom napona zaporne polarizacije može doći do proboja diode. Prije proboja iznos polja i energija elektrona rastu te elektroni postižu dovoljne energije za ionizaciju atoma poluvodiča. Na taj način se stvaraju novi parovi elektron-šupljina, koji zbog velike energije opet ioniziraju atome poluvodiča. Takva pojava se ponaša poput lavine te se ta vrsta proboja stoga naziva lavinski proboj (engl. *avalanche*). Osim lavinskog proboja, za jako dopirane poluvodiče javlja se i Zenerov proboj. Kod Zenerovog proboja dio valentnih elektrona tuneliranjem prelazi sa p- na n- stranu diode. Tuneliranje je omogućeno jer se zbog velike koncentracije primjesa širina potencijalne barijere znatno smanji.

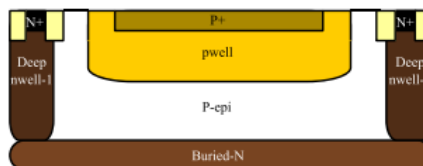


Slika 1. I-V karakteristika diode

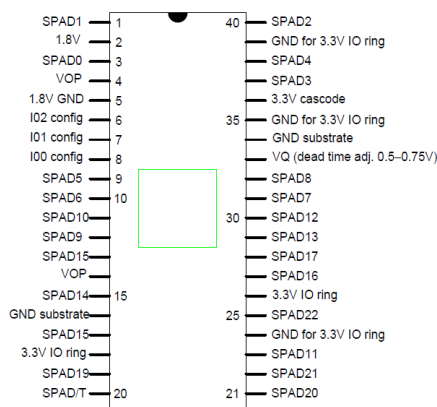
*Single-photon avalanche* diode su vrsta fotodiode koje se u strujni krug spajaju tako da su zaporno polarizirane. Kad je fotodiode neosvijetljena, njome teče vrlo mala struja manjinskih nosilaca naboja koja za silicijske fotodiode iznosi nekoliko nanoampera, a za germanijske nekoliko mikroampera. Kad se fotodiode osvijetli, pod utjecajem svjetlosne energije poraste broj slobodnih nosioca naboja te se reverzna struja poveća oko 20 puta kod germanijskih dioda, tj. 100 - 500 puta kod silicijskih. Rad dioda ispod graničnog napona se naziva Geigerovim načinom ili modom djelovanja. Nakon detekcije jednog fotona i uspostavljanja lavine, da bi došlo do detekcije sljedećeg fotona, potrebno je da se napon poveća iznad graničnog te u tom periodu ne može doći do nove detekcije. SPAD-ovi se, među ostalim, koriste u tomografiji, *Time of flight* kamerama, fluorescentnoj mikroskopiji te u kvantnoj optici kao dio generatora nasumičnih događaja. Takvi generatori nalaze primjenu u kvantnoj kriptografiji, komunikaciji i teleportaciji [1], mjerenjima EPR paradoksa [2] te u kvantnim računalima.

### Eksperimentalni postav

Mjerenja smo vršili na nasumično odabranim *nanoSPAD* diodama (Slika 2.) koje su se nalazile na *nanoSPAD40*-čipu (Slika 3.).

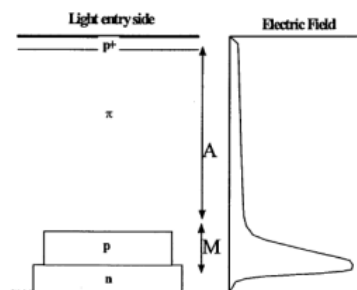


Slika 2. Presjek *nanoSPAD*-a, preuzeto iz [5]



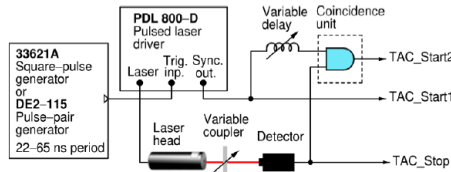
Slika 3. Shema korištenog čipa

Kada foton uđe u  $\pi$ -područje u kojem je električno polje slabo, dolazi do oslobađanja naboja koji putuje prema  $pn$ -području. U tom dijelu diode električno polje je jako te to omogućuje naboju da dostigne energiju dovoljnu za samoodrživu lavinu (Slika 4.). Kako bismo izmjerili šum, onemogućili smo dotok svjetla na diode te mjerili broj detektiranih događaja pomoću računala.



Slika 4. Prikaz električnog polja duž diode

Za mjerenja vremenske razlučivosti koristili smo pikosekundni pulsni laser (*PicoQuant*) koji se sastoji od drivera (PDL 800-D) i laserske glave (LDH-P-670) te smo njime dobili optičke pulseve  $FWHM$ -a širine 39 ps i valne duljine 676 nm (Slika 5.). Za početak i završetak mjerenja vremenskih intervala između emisije i detekcije signala koristili smo dva digitalna ulaza (TAC\_Start1 i TAC\_Stop) ORTEC-ovog 567 *Time-to-Amplitude Converter/Single-Channel Analyzer* (TAC/SCA) modela.



Slika 5. Postav za mjerenje vremenske razlučivosti, preuzeto iz [3]

## Rezultati

### A. Mjerenje šuma (engl. dark counts)

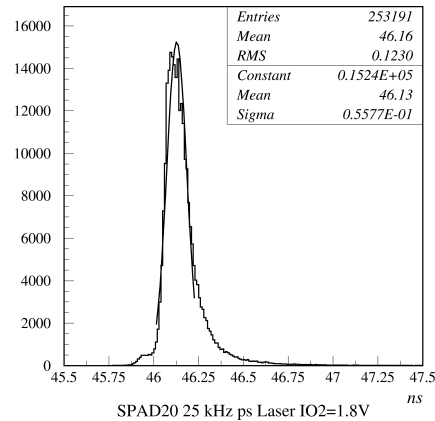
Termalna pobuđenja mogu uzrokovati slabe struje i u fotodiodama koje nisu osvijetljene te njih možemo smatrati izvorom unutarnjeg šuma detektora. Iznos šuma se povećava sa porastom napona  $V_E$  (napon iznad graničnog) [4] te sa temperaturom [5]. Također, šum ovisi i o širini područja osiromašenja te očekujemo da *SPAD*-ovi sa širim područjem osiromašenja imaju veći šum [5]. Razmatranje šuma uključuje termalno generirane nositelje kao i udio nositelja koji su tijekom lavine zarobljeni u dubljim nivoima unutar područja osiromašenja te naknadno otpušteni. Oni mogu potaknuti novu lavinu te je taj efekt (engl. *afterpulsing*) proporcionalan naponu  $V_E$ . Mjerenja šuma smo radili na sobnoj temperaturi, pri  $V_E=27.2$  V, a rezultati su prikazani u tablici 1.

<i>SPAD</i>	Šum (Hz)
<i>SPAD 2</i>	$43.4 \pm 0.6$
<i>SPAD 4</i>	$41.5 \pm 0.6$
<i>SPAD 8</i>	$39.6 \pm 0.6$
<i>SPAD 7</i>	$54.8 \pm 0.7$
<i>SPAD 12</i>	$42.6 \pm 0.6$
<i>SPAD 13</i>	$38.9 \pm 0.6$
<i>SPAD 17</i>	$61.7 \pm 0.7$
<i>SPAD 16</i>	$37.9 \pm 0.6$
<i>SPAD 22</i>	$46.5 \pm 0.6$

Tablica 1: Rezultati mjerenja šuma

### B. Mjerenje vremenske razlučivosti (engl. jitter)

Osim šuma, mjerili smo i vrijeme između emisije i detekcije signala pomoću optičkih pulseva generiranih svakih 30 ns. Vremenska razlučivost detekcije pojedinih fotona ovisi o naponu  $V_E$ , temperaturi i debljini diode [6]. Mjerenja su rađena na sobnoj temperaturi, a na dobivenu raspodjelu je napravljena prilagodba Gausijanom kako bi se dobio  $FWHM$  (Slika 6.). Rezultati prilagodbe su prikazani u Tablici 2.



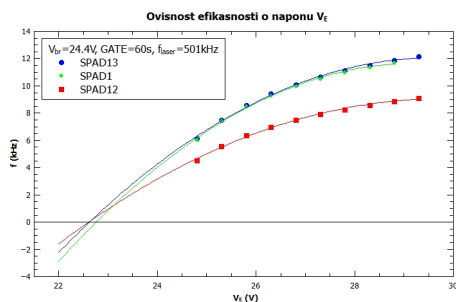
Slika 6. Prilagodba Gausijanom na dobivenu raspodjelu

SPAD	FWHM (ps), V=800 mV	FWHM (ps), V=950 mV
SPAD 2	92.2	93.3
SPAD 4	100.9	95.9
SPAD 8	87.9	90.6
SPAD 7	88.2	93.7
SPAD 12	96.9	106.2
SPAD 13	90.24	101.4
SPAD 17	87.5	95.3
SPAD 16	91.5	106.7
SPAD 22	90.9	101.3

Tablica 2: Rezultati mjerenja vremenske razlučivosti

### C. Mjerenje ovisnosti efikasnosti o naponu

Kako bismo točnije odredili granični napon mjerili smo relativnu efikasnost kao funkciju napona  $V_E$ . S obzirom da se puls pojavljuje kada lavina naraste iznad internog praga čipa, znamo da je efektivni granični napon od 24.4 V prevelik. Točniji iznos od  $(22.662 \pm 0.001)V$  je dobiven nelinearnom regresijom u programu QtiPlot (Slika 7.).



Slika 7. Nelinearna regresija ovisnosti efikasnosti o naponu  $V_E$

## Zaključak

S obzirom na to da su fotodiode važna komponenta današnjih elektroničkih uređaja koji se koriste u znanosti, medicini, telekomunikacijskim uređajima, itd., važno je poznavati njihova točna svojstva koja mogu

utjecati na performanse. Karakterizirali smo *Single-Photon Avalanche* diode te odredili šum, vremensku razlučivost i odredili točniji iznos graničnog napona. Opisane metode karakterizacije primjenjive su za različite vrste SPAD-ova, a rezultati mogu koristiti i pri konstrukciji dioda sa manjim šumom i boljom razlučivošću. Daljnja istraživanja se mogu vršiti u ovisnosti o primjeni, primjerice, ukoliko se očekuje da uređaj radi na visokim (niskim) temperaturama, potrebno je napraviti mjerenje ovisnosti šuma o temperaturi, a točniji iznos graničnog napona se može dobiti mjerenjima ovisnosti efikasnosti o naponu za još veći broj dioda istom metodom.

## Literatura

- [1] Martin Pfennigbauer, Walter R. Leeb, Markus Aspelmeyer, Thomas Jennewein, Anton Zeilinger, "Free-Space Optical Quantum Key Distribution Using Intersatellite Links", CNES - Intersatellite Link Workshop, Nov. 27th and 28th 2003
- [2] Bernhard Wittmann, Sven Ramelow, Fabian Steinlechner, Nathan K. Langford, Nicolas Brunner, Howard M. Wiseman, Rupert Ursin and Anton Zeilinger, "Loophole-free Einstein-Podolsky-Rosen experiment via quantum steering", *New J. Phys.* 14, 053030 (2012)
- [3] Mario Stipčević, Bradley G. Christensen, Paul G. Kwiat and Daniel J. Gauthier, "Advanced active quenching circuit for ultrafast quantum cryptography", *Opt. Express* 25, 21861-21876 (2017)
- [4] S. Cova, M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori, and F. Zappa, "Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection," *Appl. Opt.* 35, 1956-1976 (1996)
- [5] Chockalingam Veerappan, Edoardo Charbon, "A Low Dark Count p-i-n

Diode Based SPAD in CMOS Technology”, IEEE transactions on electron devices, vol. 63, no. 1, January 2016

[6] Mario Stipčević, ”Quantum random flip-flop and its applications in random frequency synthesis and true random

number generation”, Review of scientific instruments 87, 035113 (2016)

[7] Željko Butković, Julijana Divković Pukšec, ”Elektronika 1, I dio”, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2006.