

Analiza integriranih lavinskih fotodioda za detekciju jednog fotona

Kalšan, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:431530>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 118

**ANALIZA INTEGRIRANIH LAVINSKIH FOTODIODA ZA
DETEKCIJU JEDNOG FOTONA**

Iva Kalšan

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 118

**ANALIZA INTEGRIRANIH LAVINSKIH FOTODIODA ZA
DETEKCIJU JEDNOG FOTONA**

Iva Kalšan

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 118

Pristupnica: **Iva Kalšan (0036510331)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektronika
Mentor: prof. dr. sc. Tomislav Suligoj

Zadatak: **Analiza integriranih lavinskih fotodioda za detekciju jednog fotona**

Opis zadatka:

Objasniti rad lavinskih fotodioda za detekciju jednog fotona (engl. Single Photon Avalanche Photodiode - SPAD). Skicirati tipične strukture SPAD-ova. Navesti osnovne parametre za karakterizaciju SPAD-ova i njihove tipične vrijednosti koje su danas aktualne. Prikazati mogućnosti realizacije SPAD-ova u CMOS tehnologiji. Usporediti karakteristike sa SPAD-ovima dobivenim u zasebnim tehnologijama te navesti prednosti i nedostatke jednih i drugih. Objasniti mehanizme koji utječu na frekvenciju tamnih impulsa (engl. Dark Count Rate - DCR). Izmjeriti strujno-naponske karakteristike SPAD-ova dobivenih u standardnoj visokonaponskoj CMOS tehnologiji sa različitim topologijama i s upotrebom različitih područja CMOS procesa Izmjeriti DCR integriranih SPAD-ova. Iz mjerenih rezultata ekstrahirati naknadne impulse (engl. Afterpulsing). Analizirati dobivene karakteristike i povezati s tehnološkim parametrima i geometrijom mjerenih struktura.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Zahvaljujem se roditeljima i sestri na podršci, razumijevanju i motivaciji pruženoj tijekom studija.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Suligoju te asistentima na pruženoj pomoći i savjetima prilikom studija te posebno prilikom izrade ovog rada.

Velika hvala svim mojim prijateljima koji su ovo iskustvo ispunili lijepim i nezaboravnim trenucima.

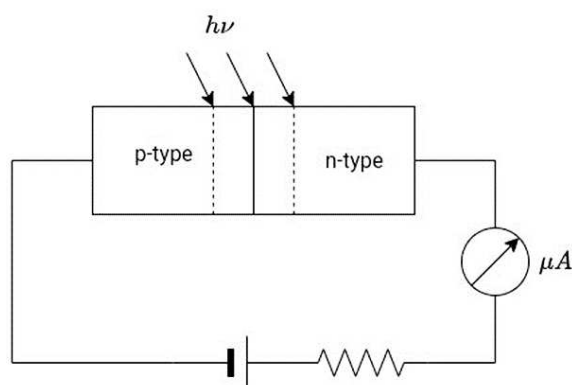
Sadržaj

Uvod	1
1. Lavinske fotodiode za detekciju jednog fotona	2
1.1. Parametri SPAD-ova	7
1.2. Realizacija SPAD-ova u CMOS-u	11
2. Mjerenja i analiza mjerenja	14
2.1. Strujno-naponske karakteristike SPAD-a	17
2.1.1. Propusne karakteristike	17
2.1.2. Zaporne karakteristike	20
2.2. Karakteristike mjerenih SPAD-ova	24
2.2.1. Analiza rezultata	72
Zaključak.....	75
Literatura.....	76
Sažetak.....	78
Summary	79

Uvod

Detekcija fotona započela je otkrićem fotoelektričnog efekta još u 19. stoljeću [1]. Fotoelektrični efekt fizikalna je pojava kod koje djelovanjem elektromagnetskog zračenja dovoljno kratke valne duljine dolazi do izbijanja elektrona iz obasjanog materijala. Taj je efekt primijetio Heinrich Hertz 1887. godine prilikom slanja i primanja elektromagnetskih valova. Albert Einstein 1905. godine objašnjava fotoelektrični efekt uvodeći točno određene količine energije ili kvant svjetlosti, kasnije nazvane foton [2].

Fotodiode, odnosno fotodetektor, su optoelektronički elementi koji za svoj rad trebaju optičko zračenje koje se zatim pretvara u električnu energiju [3]. Razvoj fotodioda započeo je razvojem p-n spoja 1939. godine u *Bell Laboratories*. P-n spoj predstavlja poluvodičku pn-diodu [4]. Reverzno polarizirana fotodiode u strujnom krugu te simbol fotodiode prikazani su na slikama u nastavku (Slika 0.1, odnosno Slika 0.2). Postoji više vrsta fotodioda, od kojih su jedna lavinske fotodiode.



Photodiode Circuit Diagram

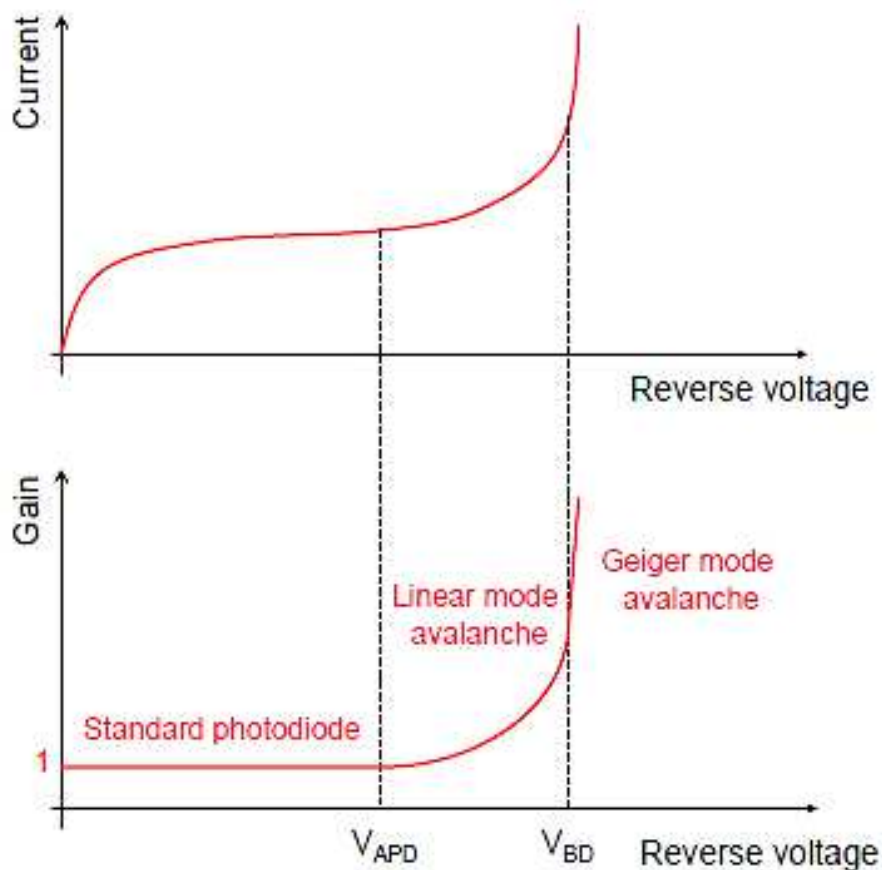
Slika 0.1 Fotodiode u električnom krugu [5]



Slika 0.2 Simbol fotodiode [6]

1. Lavinske fotodiode za detekciju jednog fotona

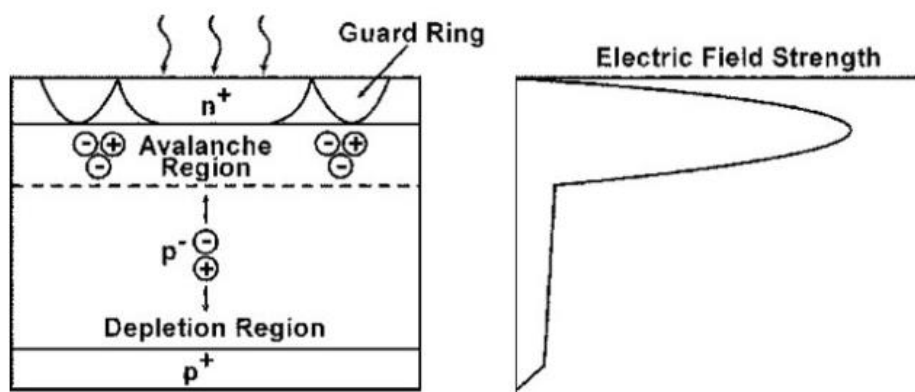
Lavinske fotodiode su reverzno polarizirani pn-spojevi koji rade pri velikim naponima, točnije na naponima pri kojima dolazi do lavinske multiplikacije (engl. *avalanche*) [7], pojave koja će biti objašnjena u nastavku rada. Lavinske fotodiode imaju dva načina rada: linearni način rada i Geigerov način rada. Kao što se može vidjeti na slici (Slika 1.1) u linearnom načinu rada priključeni su naponi manji od napona proboja, dok su u Geigerovom načinu priključeni naponi veći od napona proboja. Razlika priključenog napona i probojnog naziva se napon viška (engl. *excess voltage*, V_{EX}). U linearnom je načinu rada jačina struje proporcionalna jačini upadne svjetlosti te je pojačanje signala konačno. U Geigerovom načinu rada, struja, zbog efekta multiplikacije, nije ovisna o intenzitetu upadnog zračenja te je pojačanje signala, u teoriji, beskonačno [8].



Slika 1.1. Strujno-naponska karakteristika te pripadna karakteristika pojačanja u ovisnosti o naponu [9]

Lavinske fotodiode za detekciju jednog fotona (engl. *Single Photon Avalanche Diode*, SPAD) su fotodetektor koji radi u Geigerovom režimu te električni signal izaziva jedan foton [10]. Detektiranje jednog fotona primjenom pn-spoja bilo je predloženo još početkom 1960.-ih godina od strane *Schockley Laboratory*-ja [11].

Posljedica zaporne polarizacije je jako električno polje u osiromašenom području. Električno polje razdvaja nosioce. To se polje pojačava kako se povećava napon priključen na elektrode diode [4, 12]. Kod lavinskih je fotodiode osiromašeno područje odvojeno od multiplikacijskog područja te se teži tome da multiplikacijsko područje bude usko kako bi se spriječile nekontrolirane lavine čiji je uzrok jako električno polje (Slika 1.2) [13].

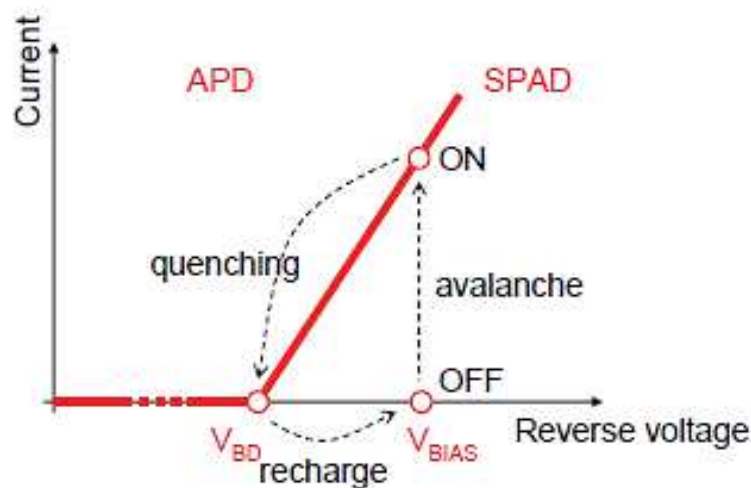


Slika 1.2 Osnovna struktura lavinske fotodiode te prikaz jačine električnog polja po dijelovima diode [13]

Kada u aktivno područje upadne foton, on generira nosioc u osiromašenom području. Taj nosioc, zbog jakog električnog polja, ima dovoljnu energiju da prilikom sudara može izbaciti druge nosioce iz kristalne rešetke čime se generiraju parovi elektron-šupljina. To je proces udarne ionizacije (engl. *impact ionization*). Generirani parovi elektron-šupljina, zbog utjecaja električnog polja, opet generiraju nove parove elektron-šupljina što povećava ukupan broj nosilaca. Taj se proces ponavlja i naziva se lavinska multiplikacija. Rezultat lavinske multiplikacije je pojačanje signala [9]. Upravo je lavinska multiplikacija, zbog pojačanja signala koje se javlja, ključna u detekciji jednog fotona.

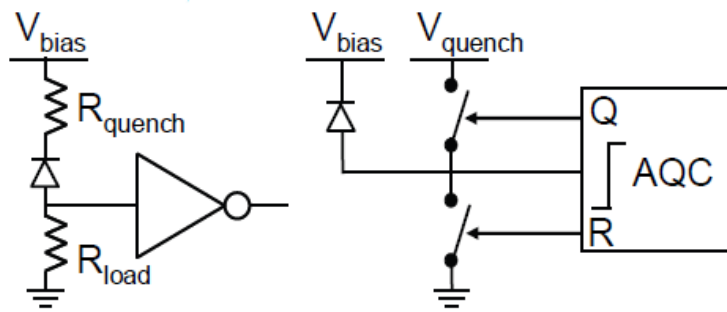
Kako ne bi došlo do oštećenja SPAD-a, lavinska se multiplikacija mora potisnuti. Za to se koriste sklopovi za potiskivanje nosioca (engl. *quenching circuits*) [14]. Oni prekidaju struju tako da smanjuju priključni napon dok ne bude manji od napona proboja. Na slici u nastavku

(Slika 1.3) prikazana je strujno-naponska karakteristika SPAD-a. Na njoj se vidi da do dolaska fotona SPAD-om ne teče struja (na slici su to naponi do V_{BD}). Dok upadne foton, dolazi do lavinske multiplikacije te struja poraste (naponi od V_{BD} do V_{BIAS}). Sklop za potiskivanje nosioca detektira taj porast struje te kada struja postigne određeni iznos započinje potiskivanje tako da se napon smanjuje sve dok ne dođe do napona proboja ili malo ispod njega. Tako se potiskuje lavinska multiplikacija. Nakon potiskivanja, SPAD je ponovno spreman za detekciju fotona [9]. Vrijeme od početka potiskivanja nosioca pa dok SPAD opet bude u mogućnosti detektirati foton naziva se mrtvo vrijeme (engl. *dead time*, T_D).



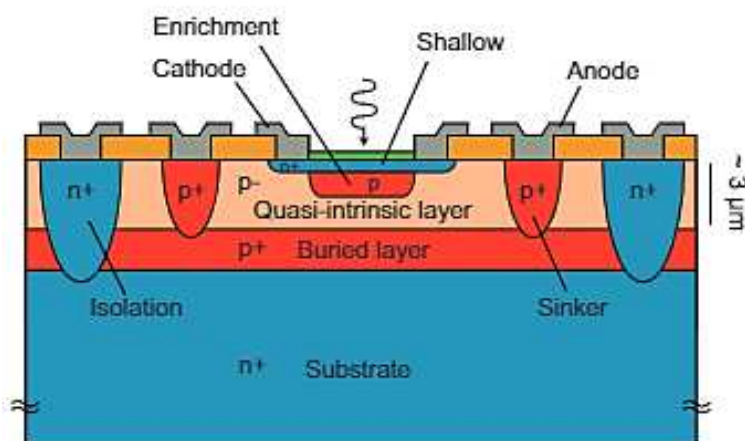
Slika 1.3 Strujno-naponska karakteristika SPAD-a [9]

Sklopovi za potiskivanje nosioca mogu biti pasivni i aktivni. Pasivni sklopovi sastoje se od otpornika spojenog u seriju sa SPAD-om. Otpornik mora biti velikog iznosa kako bi pad napona na njemu uzrokovao da radni napon na diodi padne ispod napona proboja čime se potisne multiplikacija [9]. Aktivni sklopovi složeniji su od pasivnih. Sastoje se od više elektroničkih komponenta među kojima su i aktivne. Primjer pasivnog i aktivnog sklopa prikazani su u nastavku (Slika 1.4) [15].

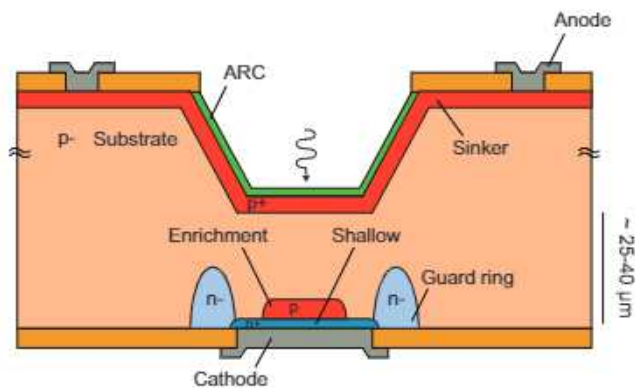


Slika 1.4 Primjer pasivnog (lijevo) i aktivnog (desno) sklopa za potiskivanje nosilaca [9]

Tipične strukture SPAD-ova su planarna struktura (Slika 1.5) te *reach-through* struktura (Slika 1.6). Planarna struktura koristi se za osvjetljenje s prednje strane sklopa te se planarni SPAD-ovi nazivaju se još *thin* SPAD-ovi. *Reach-through* strukture koriste se kad se SPAD osvjetljuje sa stražnje strane te se SPAD s tom strukturom naziva još *thick* SPAD [16]. *Reach-through* strukture postižu visoku efikasnost zbog širokog osiromašenog područja, no velika površina omogućuje pojavu multiplikacije u različitim područjima sa različitim vremenima širenja struje što pogoršava vrijeme odziva. Planarni SPAD-ovi zahtijevaju niži radni napon te imaju bolji vremenski odziv od *reach-through* struktura [15].



Slika 1.5 Planarna struktura SPAD-a [16]



Slika 1.6 Reach-through struktura SPAD-a [16]

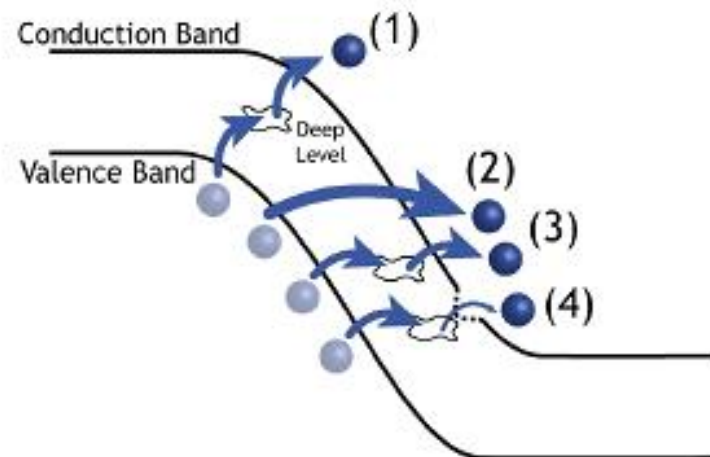
SPAD-ovi se primjenjuju u područjima gdje je potrebno precizno detektiranje fotona kao kod fluorescentne korelacijske spektroskopije (engl. *fluorescence correlation spectroscopy, FCS*), kvantne kriptografije, pozitronske emisijske tomografije (engl. *positron emission tomography, PET*), kod optičkih radara (engl. *Light Detection and Ranging, LIDAR*) itd [17].

1.1. Parametri SPAD-ova

Glavni parametri SPAD-ova su frekvencija tamnih impulsa (engl. *Dark Count Rate, DCR*), naknadno pulsiranje (engl. *afterpulsing*), efikasnost detekcije fotona (engl. *Photon Detection Efficiency, PDE*), mrtvo vrijeme (engl. *dead time, T_D*) te vremenska rezolucija (engl. *Timing resolution* ili *Jitter*) [9].

Lavinsku multiplikaciju mogu izazvati fotoni, ali i pojave unutar SPAD-a koje se nazivaju tamni impulsi (engl. *dark counts*). Frekvencija tamnih impulsa je frekvencija pri kojoj se pojavljuju tamni impulsi [9]. Izvori tamnih impulsa su termalna generacija i tuneliranje. Termalna generacija može biti izazvana nosiocima u osiromašenom području i difuzijom manjinskih nosilaca iz neutralnih područja. Prilikom procesa generacije i rekombinacije u diodi, zbog velikog električnog polja u osiromašenom području, ta generacija može izazvati lavinsku multiplikaciju. Povećanjem temperature taj se proces olakšava jer se porastom temperature dovodi više energije u sustav te tako dolazi do veće generacije nosioca. Uskladištene zamke (engl. *traps*) koje nastaju kao posljedice defekata i nečistoća u materijalu također mogu biti izvor termalne generacije [14, 18]. Kod uskladištenih zamki treba se spomenuti i Shockley-Read-Hall teorija jer ona modelira zarobljenje i otpuštanje nosioca iz zamki omogućujući stanja u zabranjenom pojasu. Prema toj teoriji postojanje zamki povećava vjerojatnost termalne generacije nosilaca [19]. Pri vrlo visoko dopiranim p- i n-stranama pn-spoja, događa se generacija nosioca zbog tuneliranja. Osiromašeno područje je usko te elektroni imaju mogućnost prijelaza tuneliranjem iz valentnog u vodljivi pojas. Tuneliranje ne ovisi o temperaturi, već je ovisno samo o električnom polju [18]. Povećanje generacije prilikom djelovanja jakog električnog polja uzrokuju tri različita mehanizma: *band-to-band* tuneliranje, *trap-assisted* tuneliranje i Poole-Frenkel efekt. *Band-to-band* tuneliranje je proces u kojem u područjima jakog polja elektroni imaju dovoljno energije da tuneliraju određenom vjerojatnošću iz valentnog u vodljivi pojas. Taj proces ovisi o energiji zabranjenog pojasa, intenzitetu električnog polja, masi nosilaca. *Band-to-band* tuneliranje može se smanjiti dobrim dizajnom SPAD-a. *Trap-assisted* tuneliranje je proces u kojem postojanje zamki ili defekata unutar osiromašenog područja dijeli energetska barijeru na dva dijela čime se omogućuje uzastpno tuneliranje kroz tnje energetske barijere i eksponencijalno povećanje vjerojatnosti tuneliranja. Poole-Frenkel efekt opisuje povećanje stope termalne emisije nosilaca u eksternom električnom polju uslijed smanjivanja barijere povezane s potencijalom duboke razine nečistoća. Od navedenih mehanizama, najveći utjecaj na nastajanje tamnih impulsa

tuneliranjem ima *trap-assisted* tuneliranje [14]. Navedeni mehanizmi generacije prikazani su na slici u nastavku (Slika 1.7).



Slika 1.7 Mehanizmi generacije nosilaca u SPAD-u: (1) SRH termalna generacija, (2) *band-to-band* tuneliranje, (3) *trap-assisted* tuneliranje, (4) Poole-Frenkel efekt [14]

Može se zaključiti da se DCR može smanjiti snižavanjem temperature te smanjenjem električnog polja. DCR ovisi i o veličini aktivnog područja tako da se povećava sa povećanjem površine aktivnog područja [9]. Neki današnji SPAD-ovi u 180 nm CMOS tehnologiji mogu postići DCR čak i manji od stotinjak Hz [20].

Naknadno pulsiranje je posljedica oslobađanja nosioca iz uskladištenih zamki u kojima su se našli tijekom prethodnih lavinskih multiplikacija [14]. Vjerojatnost naknadnog pulsiranja je omjer broja naknadnih pulsiranja te ukupnog broja lavinskih multiplikacija [15]. Uskladištene zamke imaju svoje vrijeme života. Zamke koje se nalaze između vodljivog i valentnog pojasa imaju dulje vrijeme života od ostalih zbog čega imaju najveći utjecaj na naknadno pulsiranje [9]. Uslijed oslobađanja iz zamki, ukoliko se to događa nakon mrtvog vremena, izazivaju lavinsku multiplikaciju koja je u korelaciji sa prethodnom lavinskom multiplikacijom. Ukoliko se nosioc oslobodi iz zamke tijekom mrtvog vremena, neće doći do lavinske multiplikacije. Vjerojatnost naknadnog pulsiranja povećava se sa kapacitetom pn-spoja SPAD-a te sa povećanjem napona viška, a smanjuje se produljenjem mrtvog vremena [18]. Vjerojatnost naknadnog pulsiranja (P_{ap}) dana je relacijom (1).

$$P_{ap}(t) = \int_t^{+\infty} n_{ap}(\tau) d\tau \quad (1)$$

U relaciji (1) n_{ap} je gustoća vjerojatnosti naknadnog pulsiranja, a t mrtvo vrijeme SPAD-a. Relacije za gustoće vjerojatnosti naknadnog pulsiranja za elektrone i šupljine dane su u nastavku izrazima (2) i (3).

$$n_{ap,e}(\tau) = \sum_{i=1}^N A_{e,i} e^{-e_{e,i}\tau} \quad (2)$$

$$n_{ap,h}(\tau) = \sum_{i=1}^N A_{h,i} e^{-e_{h,i}\tau} \quad (3)$$

U jednadžbama (2) i (3) N je broj zamki, $A_{e,i}$ te $A_{h,i}$ odgovarajući prefaktori, a $e_{e,i}$ i $e_{h,i}$ stopa emisije povezana sa i -tom zamkom [19]. Naknadno pulsiranje ovisi i o temperaturi. Vjerojatnost naknadnog pulsiranja pada s porastom temperature [14]. Izvedeni su SPAD-ovi koji u 180 nm CMOS tehnologiji mogu smanjiti naknadno pulsiranje na samo nekoliko posto pa čak i manje. [20]

Nekada SPAD ne generira lavinsku multiplikaciju iako je u aktivno područje upao foton. Efikasnost detekcije fotona je omjer upadnih fotona koji su izazvali lavinsku multiplikaciju (N_{detected}) te ukupnog broja upadnih fotona (N_{incident}). Izraz za efikasnost detekcije fotona računa se prema (4).

$$PDE = \frac{N_{\text{detected}}}{N_{\text{incident}}} \quad (4)$$

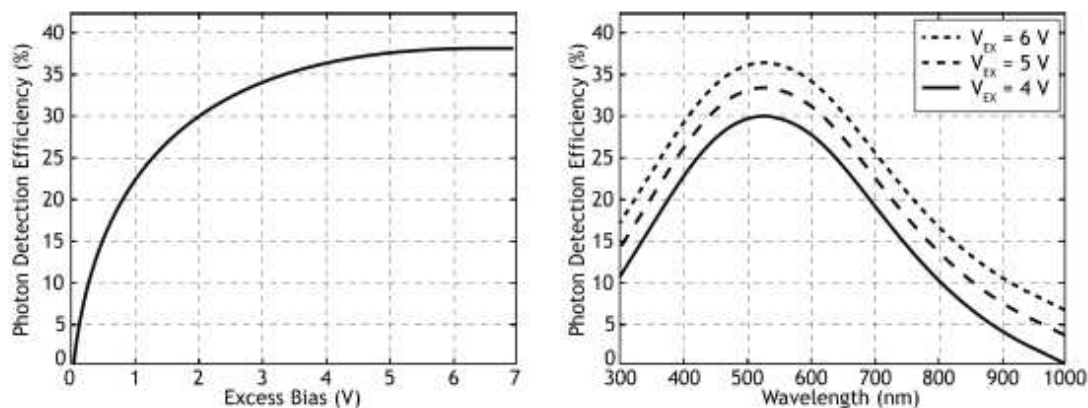
Fotoni neće generirati lavinsku multiplikaciju ukoliko se reflektiraju s površine SPAD-a, ukoliko se apsorbiraju u SPAD-u ili ukoliko upadne u aktivno područje kada sklop za potiskivanje nosilaca smanjuje priključni napon SPAD-a [9]. PDE ovisi o efikasnosti apsorpcije (η_{abs}) i vjerojatnosti pokretanja (P_T) lavinske multiplikacije. Ta se ovisnost može prikazati relacijom (5)

$$PDE(\lambda, V) = \eta_{\text{abs}}(\lambda, V) \cdot P_T(\lambda, V) \quad (5)$$

U izrazu (5) λ je valna duljina fotona, a V dovedeni napon. Efikasnost apsorpcije je vjerojatnost da foton generira par elektron-šupljina, a vjerojatnost pokretanja lavinske multiplikacije se definira kao vjerojatnost da će nosioc izazvati samoodržavajuću lavinsku multiplikaciju generiranjem beskonačnog broja nosioca uzastopnom ionizacijom [14]. Grafovi prikazani na slici (Slika 1.8) pokazuju ovisnosti efikasnosti detekcije fotona o dovedenom naponu na SPAD te o valnoj duljini upadnog zračenja. Na desnom se grafu, koji prikazuje ovisnosti o valnoj duljini, vidi da je efikasnost detekcije fotona najveća za vidljivu svjetlost [14]. Efikasnost detekcije fotona može se izraziti i kao umnožak vjerojatnosti detekcije fotona (engl. *Photon Detection Probability*, PDP) i faktora ispunjenja (engl. *Fill Factor*, FF) – izraz (6).

$$PDE = PDP \cdot FF \quad (6)$$

Pri tome je faktor ispunjena omjer aktivnog područja i ukupne površine fotodiode. Aktualne vrijednosti PDP-a dostižu čak i 90% [19].



Slika 1.8 Prikaz ovisnosti PDE o naponu viška (lijevo) te ovisnost PDE o valnoj duljini (desno) [14]

Mrtvo vrijeme je vrijeme potrebno da se uslijed rada sklopa za potiskivanje nosilaca priključeni napon spusti na probojni napon. Za to se vrijeme ne mogu detektirati upadi fotona. Mrtvo je vrijeme ovisno o vrsti sklopa za potiskivanje. Aktivni sklopovi za potiskivanje nosilaca imaju kraće mrtvo vrijeme od pasivnih sklopova te se u aktivnim sklopovima mrtvo vrijeme može preciznije kontrolirati. Zbog toga što se za vrijeme trajanja mrtvog vremena ne mogu detektirati upadi fotona, poželjno je da ono bude što kraće, no kraće mrtvo vrijeme za posljedicu ima veću vjerojatnost pojave naknadnih pulsiranja. Mrtvo vrijeme može iznositi nekoliko desetaka nanosekundi do 1 mikrosekunde [18].

Vremenska rezolucija je statistička distribucija kašnjenja detekcije dolaska fotona u obliku lavinske multiplikacije od trenutka upada fotona u aktivno područje SPAD-a [14]. Obično se karakterizira kao puna širina na polovici maksimuma (engl. *full-width-at-half-maximum*, FWHM) distribucije. Vrijednosti vremenske rezolucije na FWHM manje su od stotinjak pikosekunda [18]. Današnji CMOS SPAD-ovi mogu postići vrijeme rezolucije čak i manje od 10 pikosekundi [20]. Vremenska rezolucija se može poboljšati povećanjem napona viška [18].

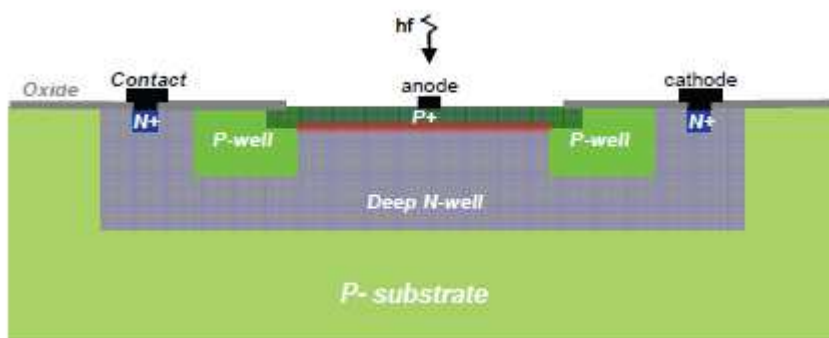
1.2. Realizacija SPAD-ova u CMOS-u

Početak 2000.-ih godina, fotodetektor za detekciju jednog fotona uspješno su se počeli implementirati *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS) procesom [11]. Glavna prednost mogućnosti proizvodnje SPAD-ova u CMOS tehnologiji jest mogućnost integracije istih sa drugim sklopovima na istom *wafers*-u te skaliranje. Također, CMOS proces omogućuje jeftinu i masovnu proizvodnju [18].

U okviru realizacije u CMOS tehnologiji, osnovna podjela je na SPAD-ove proizvedene u standardnoj CMOS tehnologiji te na one proizvedene u visokonaponskoj CMOS tehnologiji. Realizacija standardnim CMOS procesima omogućuje jeftinu proizvodnju, no ima i ograničenja kao što je nizak napon kojemu možemo izlagati SPAD. SPAD-ovi proizvedeni standardnim CMOS procesom imaju visok DCR te nizak PDE. Realizacija u visokonaponskoj CMOS tehnologiji donosi neke prednosti u odnosu na standardni CMOS proces. Naime, zbog mogućnosti izlaganja SPAD-a većem naponu, mogu se proizvesti SPAD-ovi s većim probojnim naponom što omogućuje bolji PDE na naponima višim od probojnog. Također, mogu se izvesti složenije strukture nego kod onih proizvedenih standardnim procesom [9].

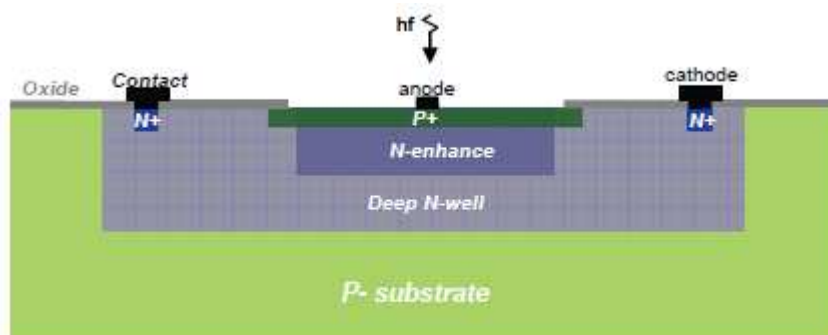
Strukture SPAD-ova u CMOS-u mogu se razlikovati prema načinu formiranja zaštitnih prstena, promjeru aktivnog područja, pn-spoju i sl. Kao mogućnosti različitih realizacija SPAD-ova u CMOS tehnologiji izdvojena je podjela na 4 različite strukture prikazane na slikama u nastavku.

Prva struktura (Slika 1.9) prikazuje presjek strukture SPAD-a kod kojega p-otoci čine difundirani zaštitni prsten (engl. *diffused guard ring*). P-otoci su slabo dopirani te implantirani na periferiji spoja. Sprječavaju proboj na rubovima tako da smanjuju električno polje na rubovima spoja. Struktura omogućava proboj na niskim naponima. Karakteristike ove strukture su visoki DCR, nejednoliki PDE duž površine aktivnog područja te duga vremenska rezolucija [9].



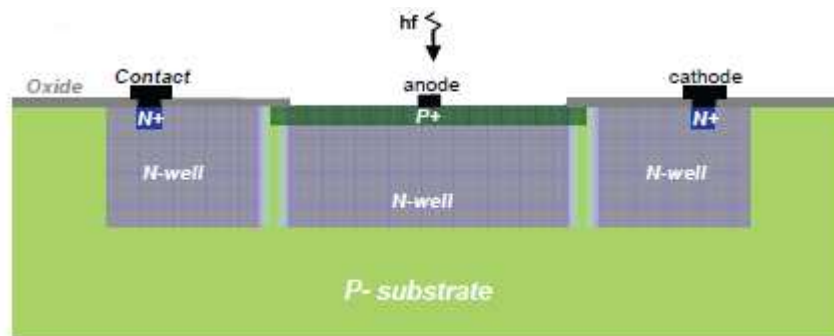
Slika 1.9 Presjek strukture SPAD-a sa difundiranim zaštitnim prstenom [9]

Sljedeća struktura prikazuje SPAD sa virtualnim zaštitnim prstenom, također nazvana *enhancement mode* struktura (Slika 1.10). U toj se strukturi ispod p+ područja implantira područje koje je na slici označeno sa *N-enhance* koje je jače dopirano od dubokog n-otoka (*deep N-well*). Slabije dopirani *deep N-well* sprječava proboj na rubovima spoja. *N-enhance* područje još se naziva virtualni zaštitni prsten. U odnosu na prethodnu strukturu, ova ima poboljšanu vremensku rezoluciju [9].



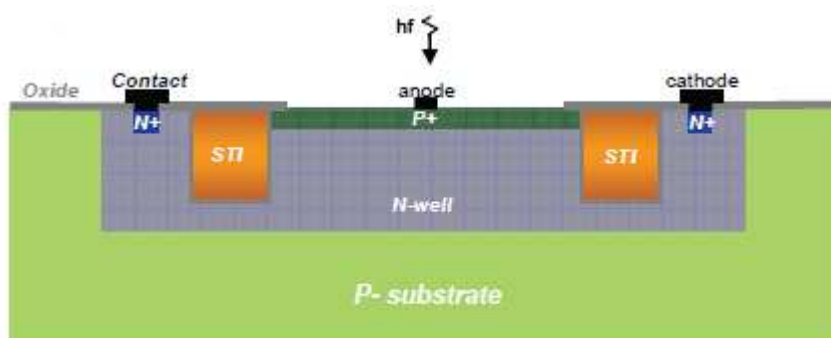
Slika 1.10 Presjek strukture SPAD-a sa virtualnim zaštitnim prstenom [9]

Treća prikazana struktura ima implantirane zaštitne prstene (engl. *merged implant guard rings*) (Slika 1.11). Temelji se na dva n-otoka koja su smještena jedan blizu drugome što stvara lokalizirano područje slabog polja te tako sprječava proboj na rubu strukture. Ta struktura ima dobre vrijednosti DCR-a, PDE-a te vremenske rezolucije, no mana je što je teško izvesti implantaciju kojom bi se dobila takva struktura [9].



Slika 1.11 Presjek strukture SPAD-a sa implantirani zaštitni prsteni [9]

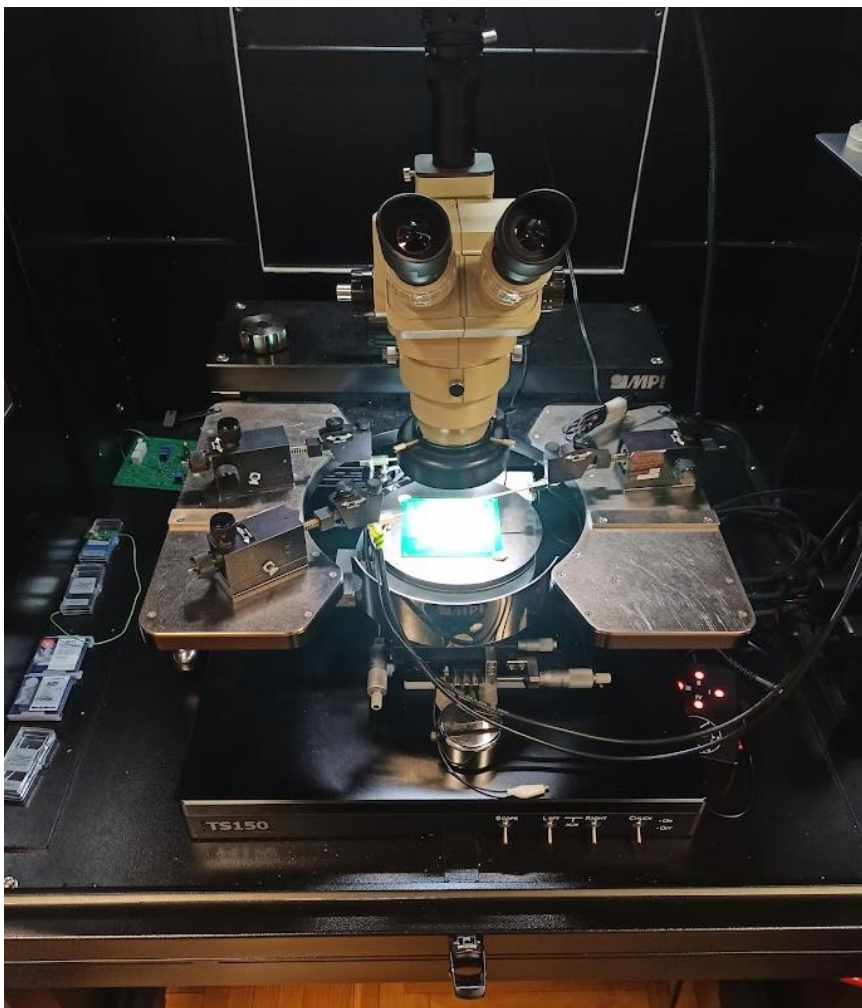
Posljednja struktura (Slika 1.12) prikazuje izvedbu sa plitkim žljebnim izolacijama kao zaštitnim prstenima (engl. *Shallow Trench Isolation guard ring*, STI). STI je ustvari izjetkano područje ispunjeno oksidom. Ono se koristi kao fizički zaštitni prsten te tako osigurava polje ispod p+ područja. Nedostatak takve strukture je visoki DCR s obzirom na površinu aktivnog područja. U ovoj strukturi, povećanje aktivnog područja nema utjecaj na vremensku rezoluciju. Snižavanje kapaciteta pn-spoja rezultira poboljšanjem mrtvog vremena. [9]



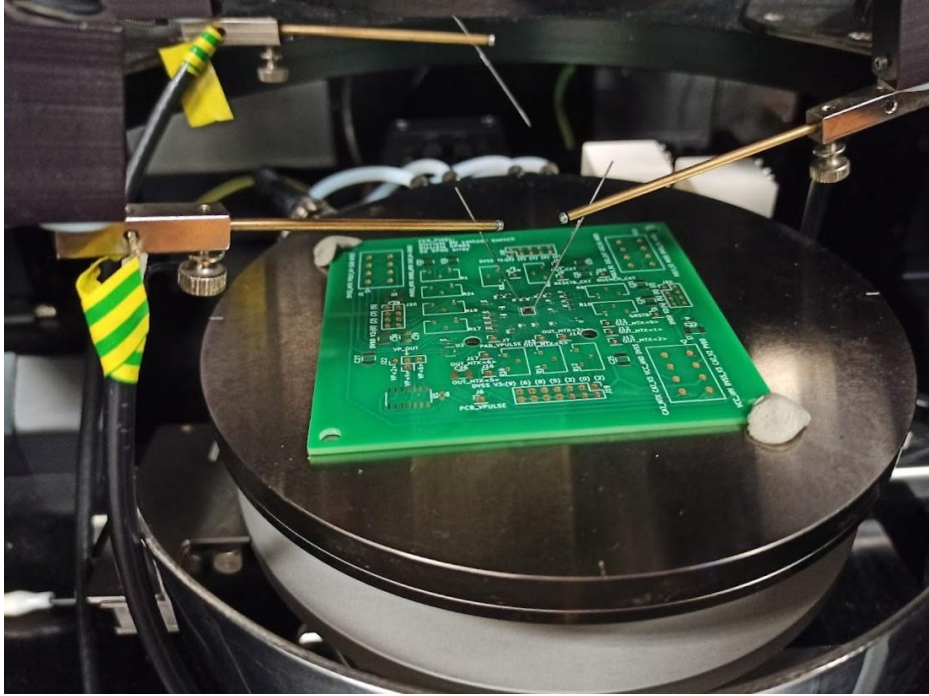
Slika 1.12 Presjek strukture SPAD-a sa plitkom žljebnom izolacijom [9]

2. Mjerenja i analiza mjerenja

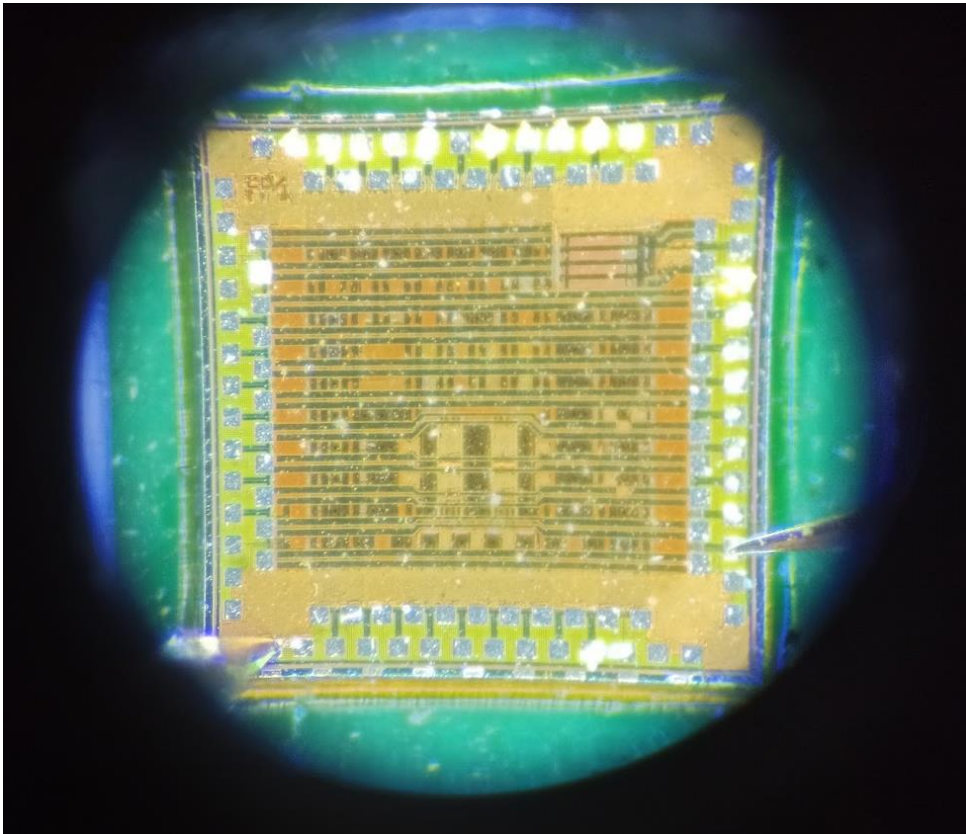
Mjerenja su se izvodila na *wafer*-u FER_PIXEL SPAD v2 (chip 2). SPAD je proizveden u 180 nm CMOS tehnologiji. *Wafer* sa SPAD-ovima za vrijeme mjerenja bio je neosvijetljen u *dark box*-u (Slika 2.1) te su fokus mjerenja bile pojave tamnih impulsa kako bi se mogli izračunati frekvencija tamnih impulsa te naknadno pulsiranje. Pojave tamnih impulsa mjerile su se za katode 1-7 SPAD-a (čip na kojem su se vršila mjerenja i detalj čipa pod mikroskopom prikazani su na slikama Slika 2.2, odnosno Slika 2.3). Od mjerne opreme koristili su *se source measure unit* (SMU) te osciloskop. Sklop za potiskivanje nosioca bio je pasivni, odnosno otpornik iznosa 150k Ω .



Slika 2.1 Wafer u dark-box-u

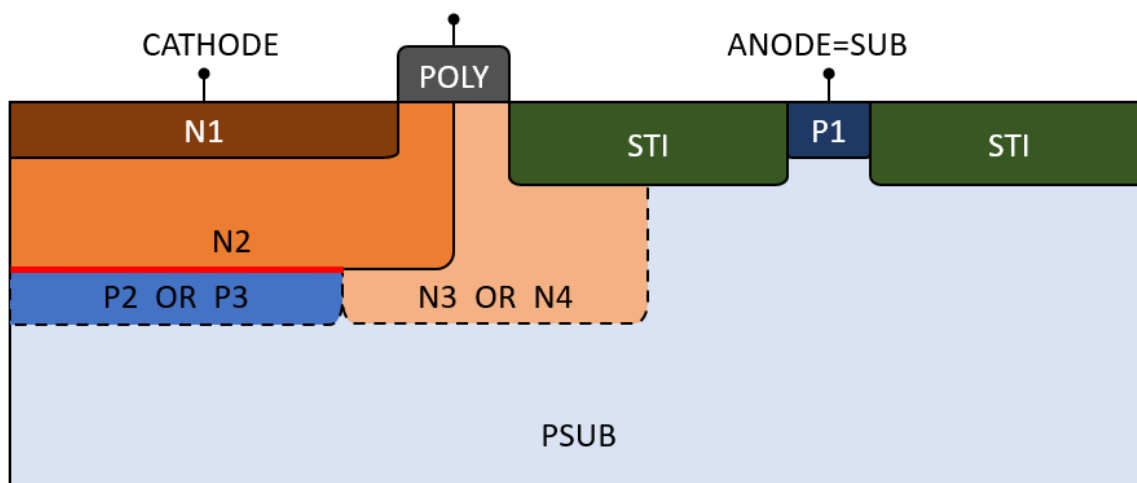


Slika 2.2 Čip na kojem se nalaze anode i katode koje se mjere



Slika 2.3 Dio čipa na kojem su se izvršavala mjerenja pod mikroskopom

Na slici u nastavku (Slika 2.4) prikazana je desna polovica presjeka SPAD-a na kojem su se radila mjerenja.



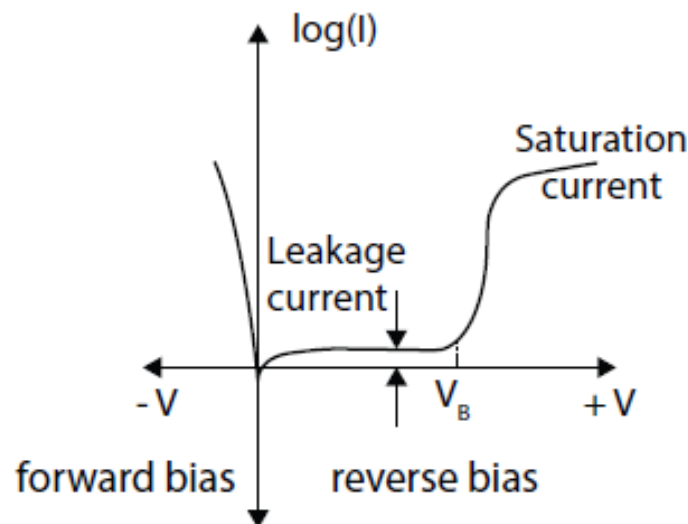
Slika 2.4 Desna polovica presjeka SPAD-a

Tablica 1. Karakteristike dioda mjerenih SPAD-ova

Broj katode	Polumjer katode	Napomena
1.	10	
2.	10	U odnosu na 1. katodu, sadrži i područje N4
3.	10	U odnosu na 1. katodu, ne sadrži <i>poly spacer</i>
4.	10	U odnosu na 1. katodu, P2 poravnat je sa N1
5.	10	U odnosu na 1. katodu sadrži P3
6.	10	U odnosu na 1. katodu, N2 je proširen do STI
7.	5	Ima dvostruko manji promjer u odnosu na 1. katodu

2.1. Strujno-naponske karakteristike SPAD-a

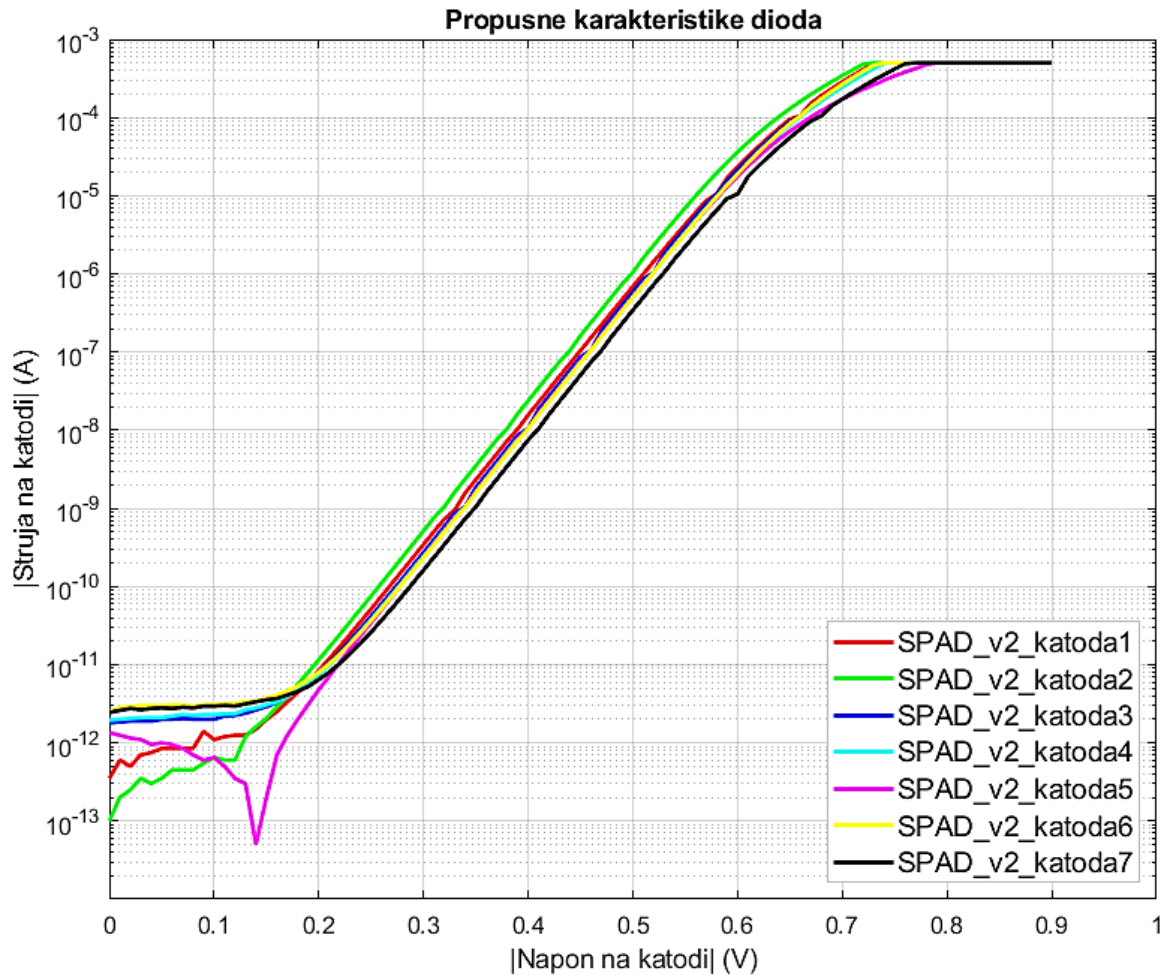
Prvo su se mjerile propusna i zaporna karakteristika svakog SPAD-a. Rezultati tih mjerenja detaljnije su opisani u nastavku. Strujno-naponska karakteristika SPAD-a prikazana je na slici (Slika 2.5). Postoje dva glavna dijela karakteristike: propusno polarizirani dio (engl. *forward bias*) te zaporno ili reverzno polarizirani dio (engl. *reverse bias*).



Slika 2.5 Strujno-naponska karakteristika SPAD-a [19]

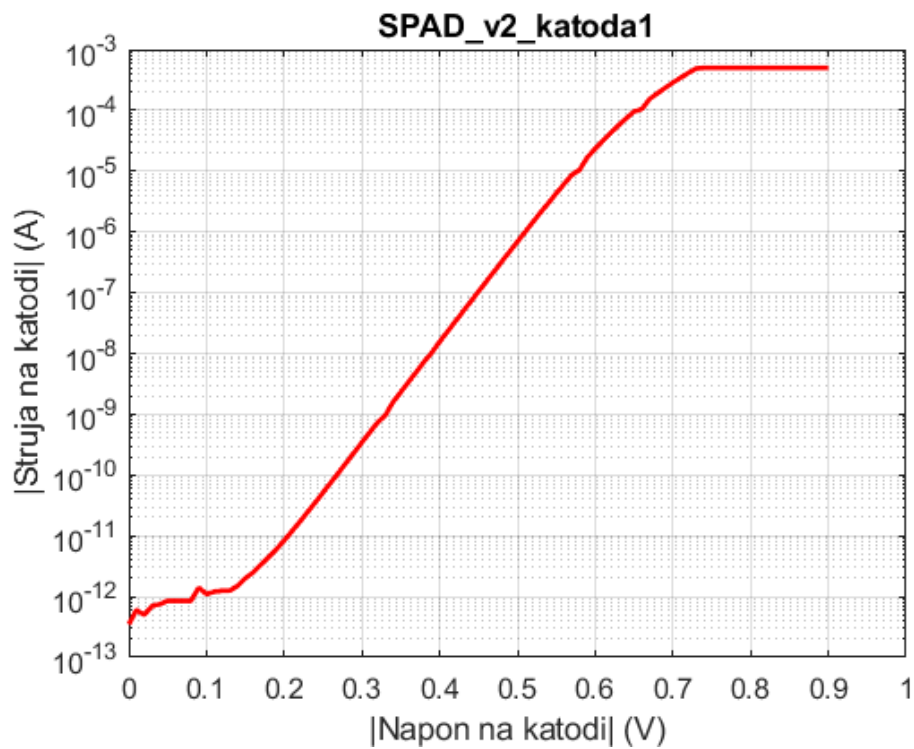
2.1.1. Propusne karakteristike

Prvo su se izmjerile strujno-naponske karakteristike propusno polariziranih SPAD-ova pri čemu je napon doveden na elektrode bio u rasponu od 0 V do 1 V. Karakteristike su prikazane na slici u nastavku (Slika 2.6), a među njima nema značajnih razlika. Odsječak na osi ordinata određuje iznos struje zasićenja. U rasponu napona od otprilike 0.2 V do otprilike 0.6 V karakteristika je pravac i u tom se rasponu preklapa s karakteristikom idealne diode. Pri naponima većim od 0.6 V karakteristika više nije lijepi pravac već se nagib karakteristike počinje smanjivati jer se rast struje s naponom polako usporava zbog serijskog otpora diode. Pri naponu od 0.74 V struja više ne raste s naponom već je konstantnog iznosa $I=499.9 \mu\text{A}$. Razlog tomu je što smo na mjernom uređaju ograničili da iznos struje ne smije prijeći granicu od 500 μA kako ne bi došlo do oštećenja SPAD-a.

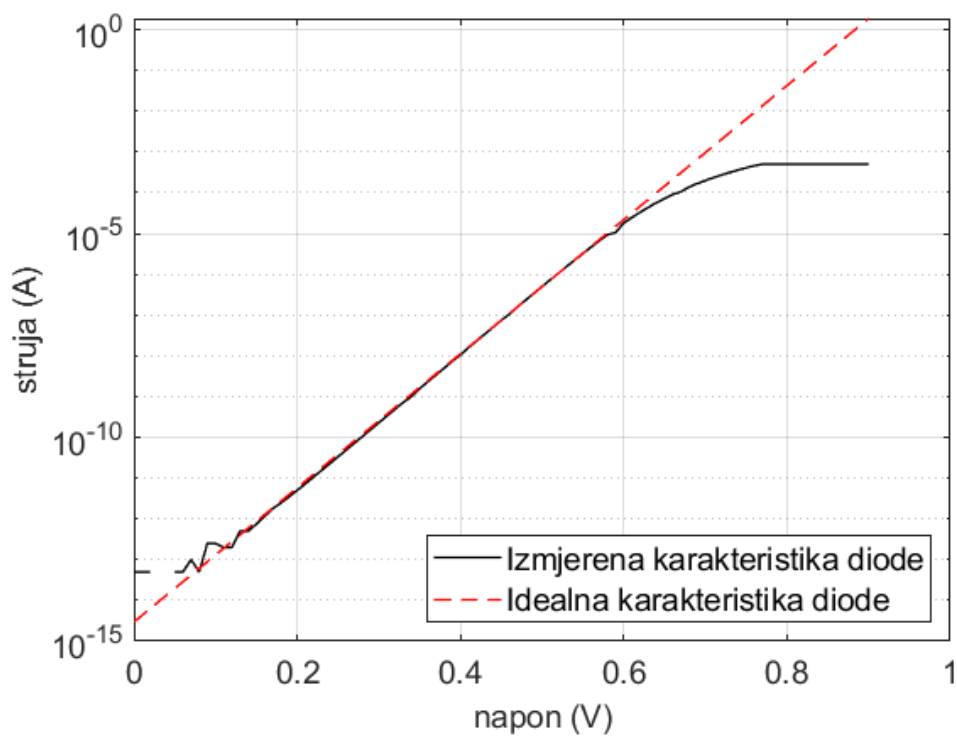


Slika 2.6. Graf sa prikazanim izmjerenim propusnim karakteristikama SPAD-ova

Na slikama u nastavku (Slika 2.7 te Slika 2.8) prikazana je izdvojena propusna karakteristika prve katode. Na prvoj je slici (Slika 2.7) samo izdvojena propusna karakteristika 1. SPAD-a. Iz te izmjerene karakteristike diode može se dobiti idealna karakteristika te diode, to jest pravac. Izmjerena karakteristika zajedno sa idealnom karakteristikom također je prikazana u nastavku (Slika 2.8) . Vidi se da se linearni dio izmjerene karakteristike preklapa sa idealnom karakteristikom. Iz idealnih se karakteristika mogu ekstrahirati vrijednosti struja zasićenja za pojedine diode. Te su vrijednosti prikazane u tablici Tablica 2.



Slika 2.7 Graf sa izdvojenom propusnom karakteristikom 1. SPAD-a



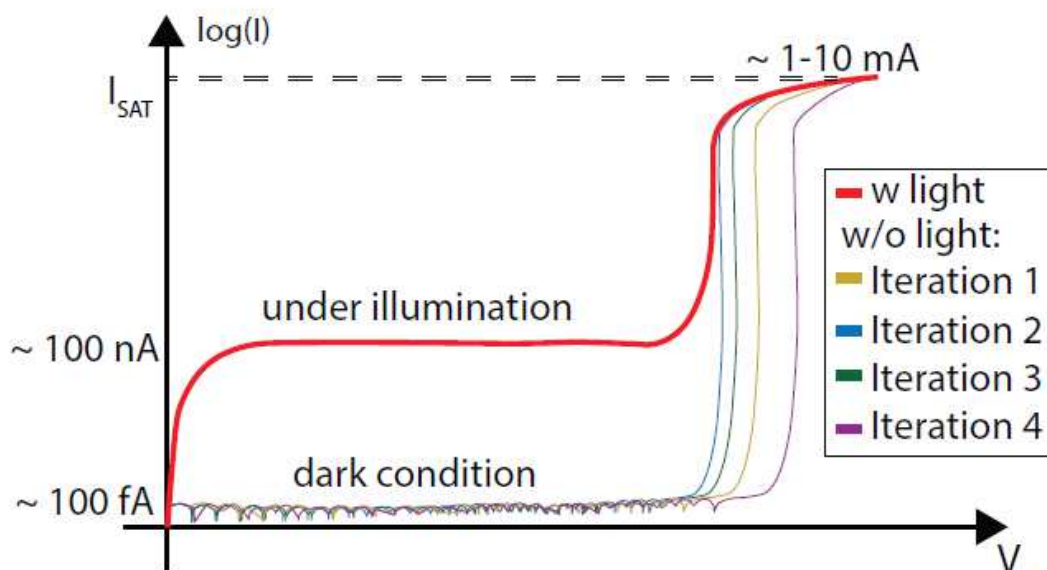
Slika 2.8 Graf sa prikazanom izmjerenom i idealnom propusnom karakteristikom 1.SPAD-a

Tablica 2 Iznosi struja zasićenja ekstrahirani iz karakteristike idealne diode

Broj katode	Struja zasićenja I_s , fA
1	2.9578
2	7.0011
3	2.6341
4	2.7319
5	2.8655
6	2.5915
7	1.8830

2.1.2. Zaporne karakteristike

Nakon izmjerenih propusnih strujno-naponskih karakteristika SPAD-ova, mjerile su se zaporne karakteristike. Na slici (Slika 2.9) je prikazan primjer strujno-naponske karakteristike zaporno polarizirane diode kada se mjeri osvijetljena te neosvijetljena. Kada je dioda osvijetljena, struja curenja veća je nego kada se mjere karakteristike neosvijetljene diode. Zbog toga što su se mjerenja u ovom radu odvijala s neosvijetljenim SPAD-ovima očekuju se mali iznosi struja curenja.

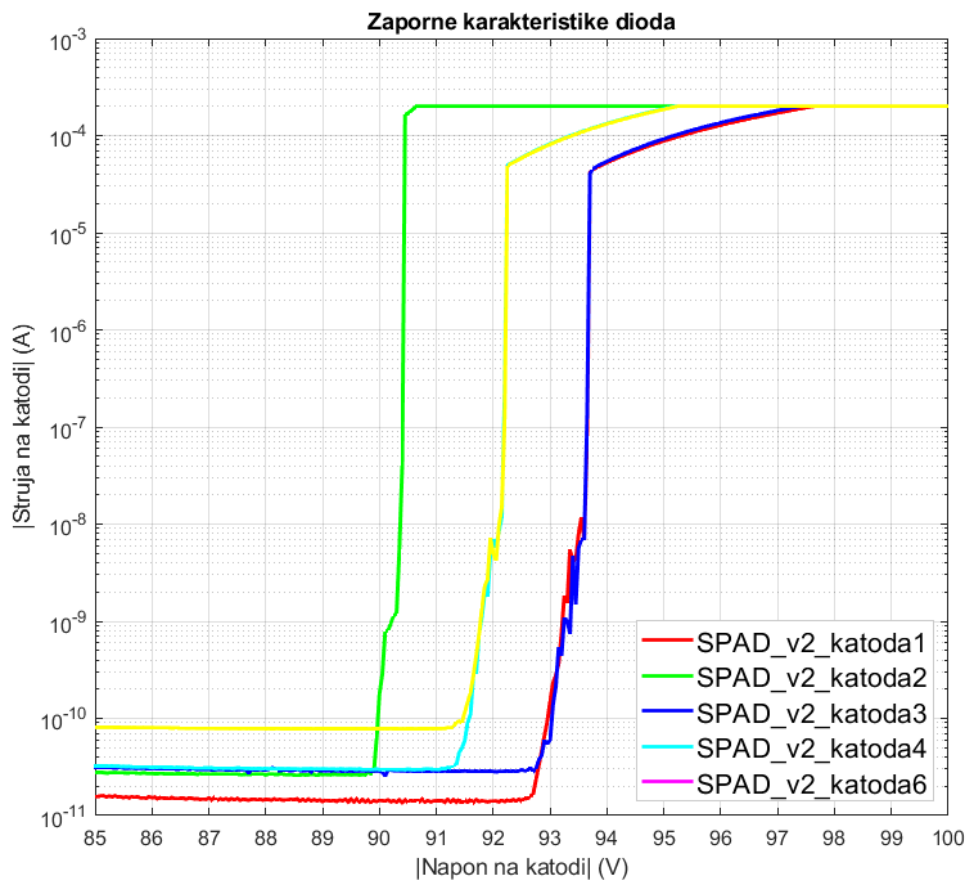


Slika 2.9 Primjer strujno-naponske karakteristike SPAD-a kada je osvijetljen i kada nije osvijetljen [19]

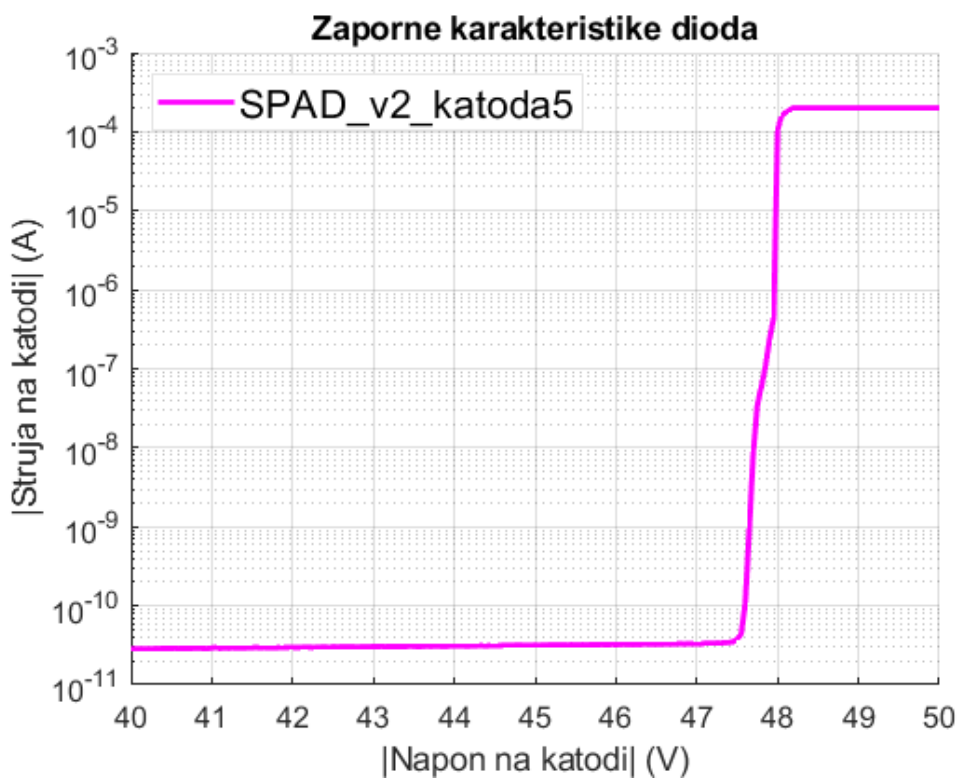
Pomoću zapornih karakteristika odredili su se naponi proboja SPAD-ova. Pri mjerenju se napon na katodi držao na konstantnih 0 V, a napon na anodi se povećavao, zbog zaporne polarizacije u negativnom smjeru, dok nije došlo do proboja. Okvirni probojni napon se odredio tako da se pogledala tablica točaka karakteristike dobivena SMU-om. Zatim se točan napon proboja odredio pomoću osciloskopa. Na karakteristikama se vidi nagli porast struje tek na naponima koji su nešto viši od probojnog zbog toga što je potrebno neko vrijeme nakon proboja da struja zbog lavinske multiplikacije poraste toliko da se porast može vidjeti na grafu. Za SPAD-ove 1, 2, 3, 4 i 6 proboj se dogodio između 91 V i 94 V tako da se njihove karakteristike mogu prikazati na jednom grafu (Slika 2.10). Za 5. SPAD proboj se dogodio na 47.7 V te je njegova zaporna karakteristika prikazana na zasebnom grafu (Slika 2.11). Određivanje napona proboja za 7. SPAD započelo se istim postupkom kao i za ostalo te se utvrdilo da je njegov probojni napon veći od 100 V. SMU ima ograničenje da ne može puštati kroz SPAD napon veći od 100 V. Zbog toga se katoda u ovom slučaju držala na konstantnom naponu iznosa +20 V, a napon na katodi se povećavao u negativnom smjeru sve dok se nije dogodio proboj, tako da se kroz anodu ustvari puštao napon veći od 100 V (iznosi napona su u stvarnosti bili uvećani za 20 V u odnosu na prikazane). Probojni napon za 7. SPAD je 107.3 V i pripadna karakteristika prikazana je također na zasebnom grafu (Slika 2.12). Zbog prethodno navedenog razloga naponi na apcisi, iako su na grafu u rasponu od 80 V do 95 V, u stvarnosti su naponi od 100 V do 115 V. Svi probojni naponi prikazani su u tablici (Tablica 3). Pri mjerenju ovih karakteristika, na SMU je struja ograničena na 200 μ A da ne bi došlo do oštećenja SPAD-ova.

Tablica 3 Probojni naponi SPAD-ova

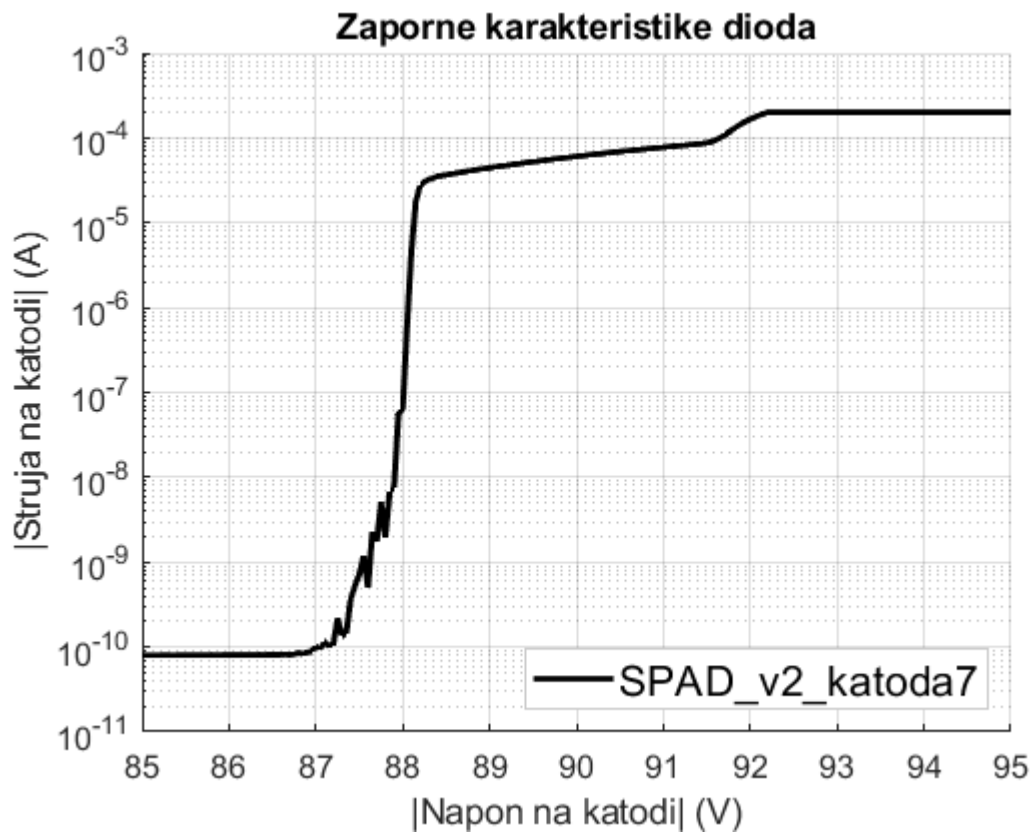
Broj SPAD-a	Probojni napon, V
1.	92.9
2.	90.0
3.	93.2
4.	91.7
5.	47.7
6.	91.7
7.	107.3



Slika 2.10 Graf sa prikazanim izmjerenim zapornim karakteristikama 1.-4. te 6. SPAD-a



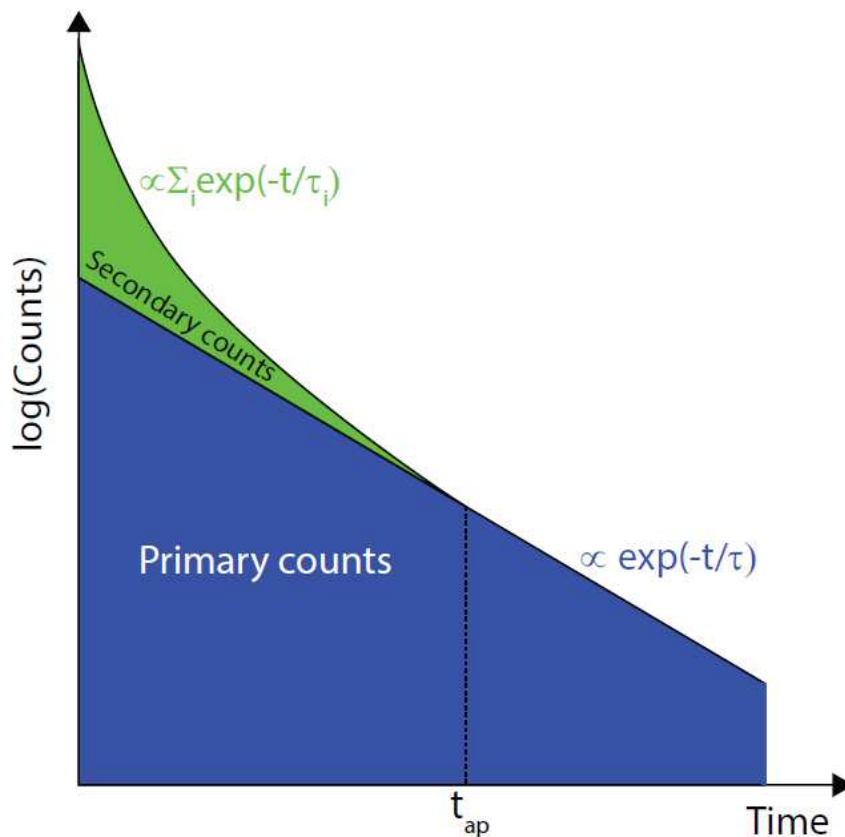
Slika 2.11 Graf sa prikazanom izmjerenom zapornom karakteristikom 5. SPAD-a



Slika 2.12 Graf sa prikazanom izmjerenom zapornom karakteristikom 7. SPAD-a

2.2. Karakteristike mjerenih SPAD-ova

Kada se odredio probojni napon, na SPAD se spajalo pet različitih iznosa napona viška: $V_{EX}=1\text{ V}$, $V_{EX}=2\text{ V}$, $V_{EX}=3\text{ V}$, $V_{EX}=4\text{ V}$ i $V_{EX}=5\text{ V}$ te su se spremale karakteristike iz kojih su se kasnije odredili frekvencija tamnih impulsa te naknadno pulsiranje. Za svaki napon viška SPAD-a su se prikupili podaci iz kojih su se mogla iscrtati dva grafa. Prvi graf pokazuje lavinske multiplikacije izazvane tamnim impulsima. Drugi je graf histogram vremena između dolazaka impulsa (engl. *The Inter-arrival time technique*) [19]. Konstruira se histogram koristeći vremena između dolazaka dva uzastopna lavinska impulsa. Kada bi se histogram sastojao samo od vremena između tamnih impulsa, površina ispod eksponencijalne krivulje koju čini distribucija odgovarala bi tamnim impulsima. U ovom slučaju impulsi koji izazivaju lavinsku multiplikaciju nisu samo tamni impulsi već i naknadno pulsiranje postoje izobličenja u distribuciji. Primjer takvog histograma prikazan je na slici u nastavku (Slika 2.13). Plava površina na slici označava tamne impulse, a zelena površina broj naknadnih pulseva [19].



Slika 2.13 Primjer histograma vremena između dolazaka impulsa [19]

U histogramu se iscrtava idealni pravac koji bi pratio stupce savršeno u slučaju da nije bilo naknadnih pulsiranja. Sva nepreklapanja sa pravcem ukazuju na to da je došlo do naknadnih pulsiranja. Broj naknadnih pulseva dobiva se oduzimanjem površine iznad idealnog pravca od površine ispod pravca za pojedini stupac. Vjerojatnost naknadnih pulseva smanjuje se sa povećanjem vremena između dolaska impulsa.

Za očekivati je da će rezultati mjerenja svih SPAD-ova pokazati povećanje DCR-a i pojave naknadnih pulsiranja kako se povećava napon viška. U nastavku rada bit će prikazani rezultati mjerenja u obliku tablica s prikazanim frekvencijama tamnih impulsa te postotcima koji govore koliko je tih tamnih impulsa bilo naknadno pulsiranje. Također, bit će prikazani grafovi koji prikazuju tamne impulse različitih napona viška za sve katode te odgovarajuće histograme.

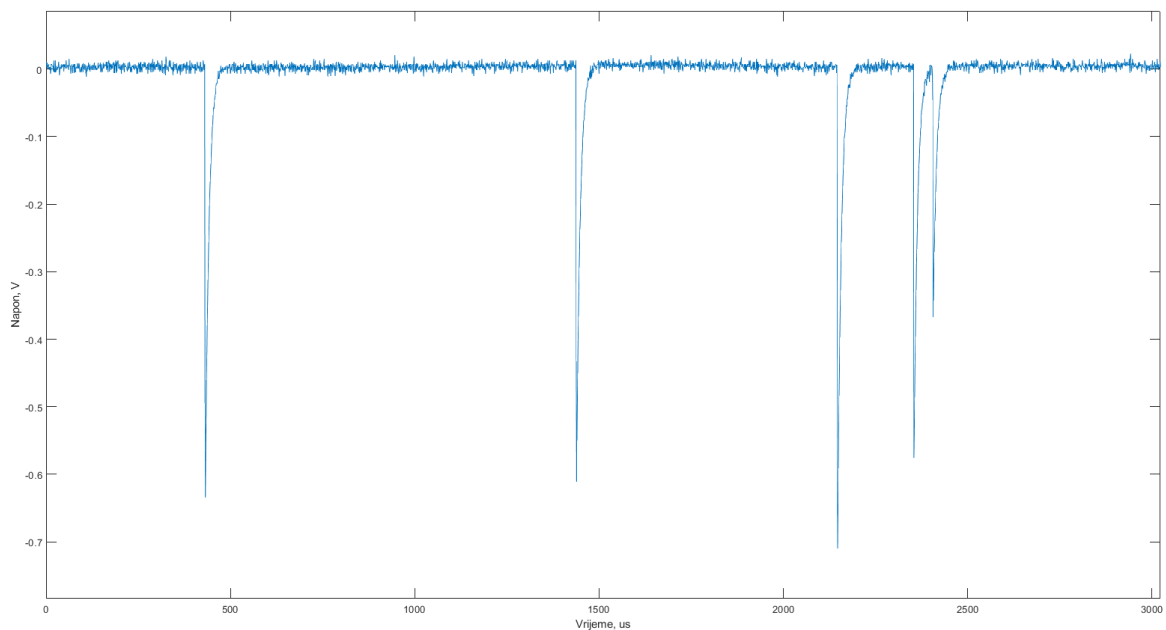
Za prvi SPAD, čiji je napon proboja 92.9 V, vrijednosti DCR-a te postotak pojave naknadnog pulsiranja za svih pet različitih napona viška prikazani su u tablici u nastavku (Tablica 4). Kao što bi trebalo, frekvencija tamnih impulsa povećava se sa povećanjem napona viška. DCR bi se, u teoriji, trebao povećavati linearno s povećanjem napona viška, no to se ne vidi u podacima dobivenim mjerenjem. U stvarnosti se DCR povećavao nelinearno.

Tablica 4 DCR i naknadno pulsiranje za 1. SPAD za različite priključene napone, odnosno napone viška

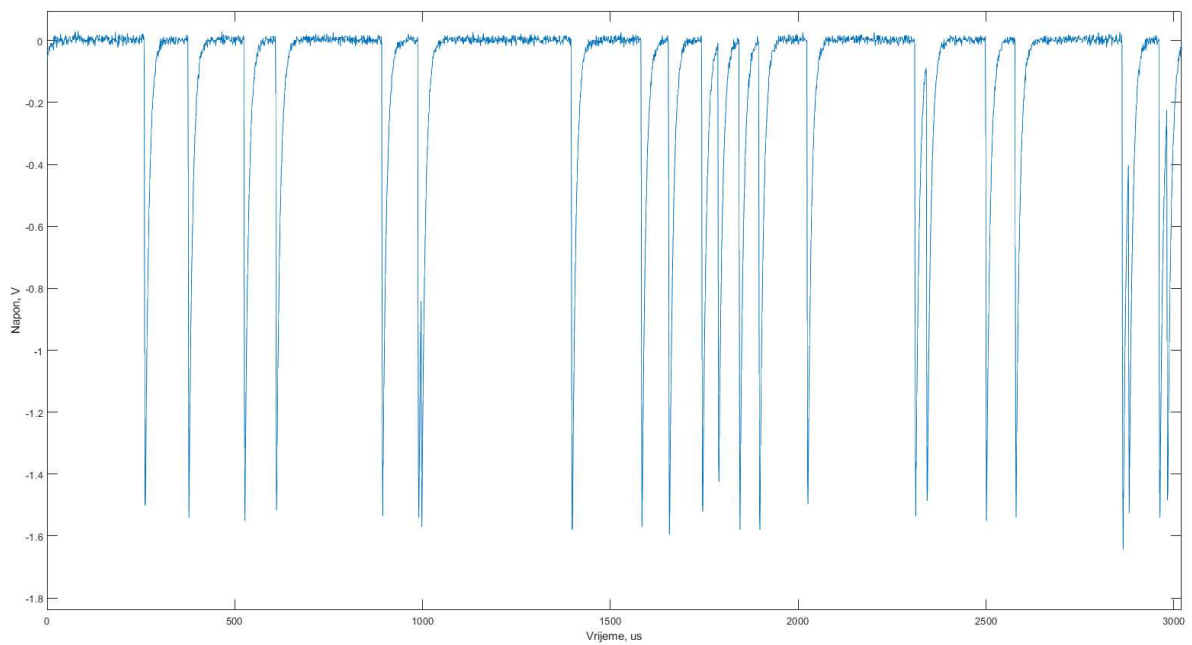
Priključeni napon V_B	Napon viška V_{EX}	DCR, Hz	Pojava naknadnog pulsiranja, %
$V_B = 93.9 \text{ V}$	$V_{EX} = 1 \text{ V}$	387.53	-1.88
$V_B = 94.9 \text{ V}$	$V_{EX} = 2 \text{ V}$	2645.4	-7.92
$V_B = 95.9 \text{ V}$	$V_{EX} = 3 \text{ V}$	8804.1	-24.15
$V_B = 96.9 \text{ V}$	$V_{EX} = 4 \text{ V}$	15788	-54.79
$V_B = 97.9 \text{ V}$	$V_{EX} = 5 \text{ V}$	20629	-75.43

U nastavku su prikazani grafovi koji prikazuju pojave tamnih impulsa u istom vremenskom intervalu za različite napone viška prvoga SPAD-a (Slika 2.14, Slika 2.15, Slika 2.16, Slika 2.17 te Slika 2.18). Osim prema podacima iz tablice (Tablica 4) i u grafovima sa tamnim impulsima može se vidjeti da se u istom vremenskom intervalu, broj tamnih impulsa povećava kako se povećava napon viška. Za napone viška iznosa $V_{EX} = 1 \text{ V}$ te $V_{EX} = 2 \text{ V}$ vidi se da se napon nakon pojave impulsa vraća do početnog što znači da je sklop za potiskivanje uspio u potpunosti potisnuti napon te da je mrtvo vrijeme dovoljno dugo. Za veće napone viška,

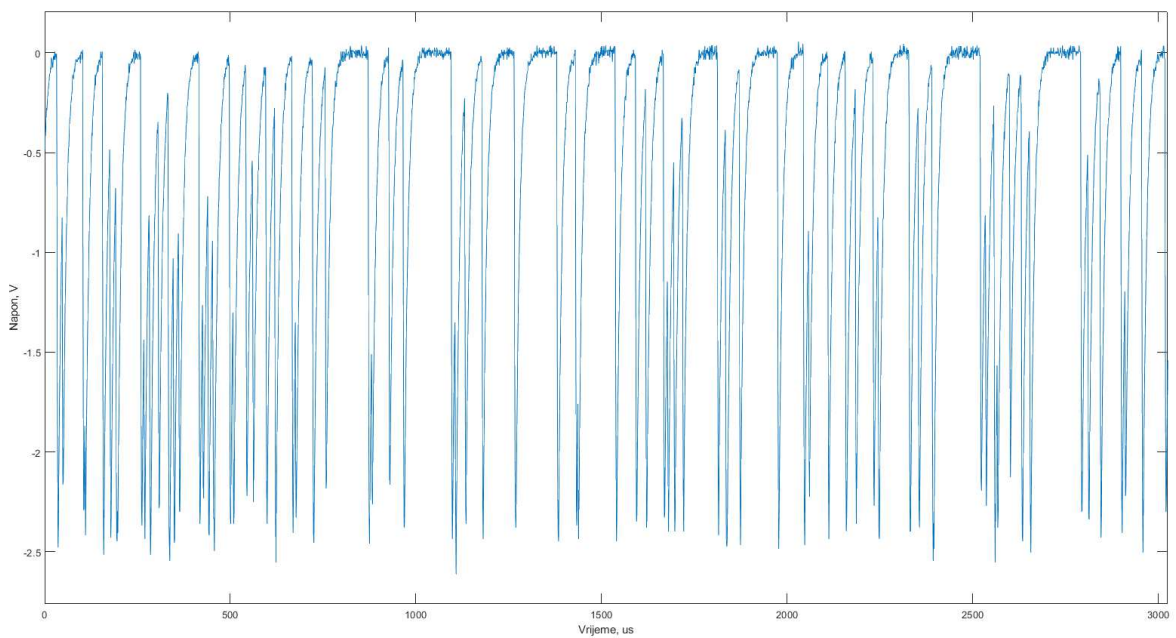
odnosno $V_{EX}=3$ V, $V_{EX}=4$ V i $V_{EX}=5$ V, sklop za potiskivanje napona ne stigne vratiti priključni napon na početni, nego dolazi do pojave sljedećeg tamnog impulsa prije kraja mrtvog vremena. Pojavljivanje takvih prijevremenih tamnih impulsa povećava se sve više kako se povećava priključeni napon viška. To znači da je u tom trenutku napon viška bio efektivno manji od onog koji je ustvari bio priključen. Najgori je slučaj za $V_{EX}=5$ V gdje se u grafu vidi da napon jako rijetko dođe do početne vrijednosti, to jest da se napon potisne bez dolaska tamnog impulsa u tom vremenskom intervalu. Pojavljivanje tih impulsa u intervalu kada se napon potiskuje ukazuje na to da je mrtvo vrijeme predugo. Ta bi se pojava mogla ukloniti poboljšanjem sklopa za potiskivanje nosilaca, odnosno korištenjem aktivnog sklopa za potiskivanje nosilaca. Iz izmjerenih podataka vidi se da se i naknadno pulsiranje povećavalo s povećanjem napona viška. Negativne vrijednosti naknadnih pulsiranja ustvari nisu fizikalno moguće, no do njih dolazi zbog pojave tamnih impulsa i naknadnih pulsiranja u mrtvom vremenu.



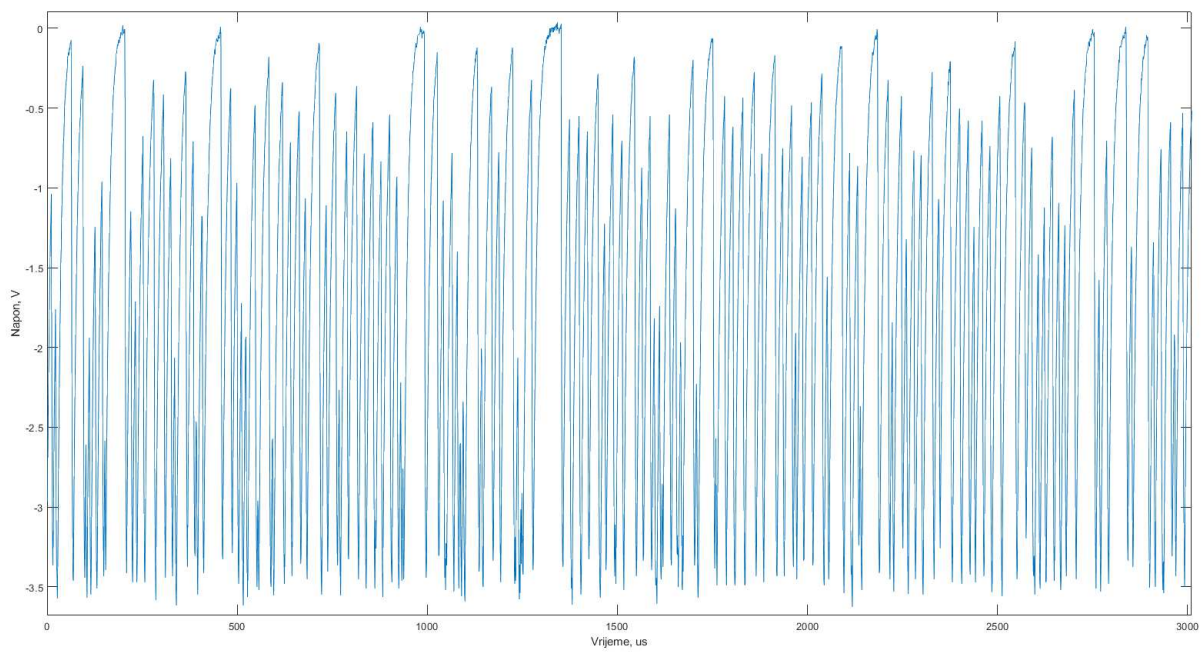
Slika 2.14 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 1. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



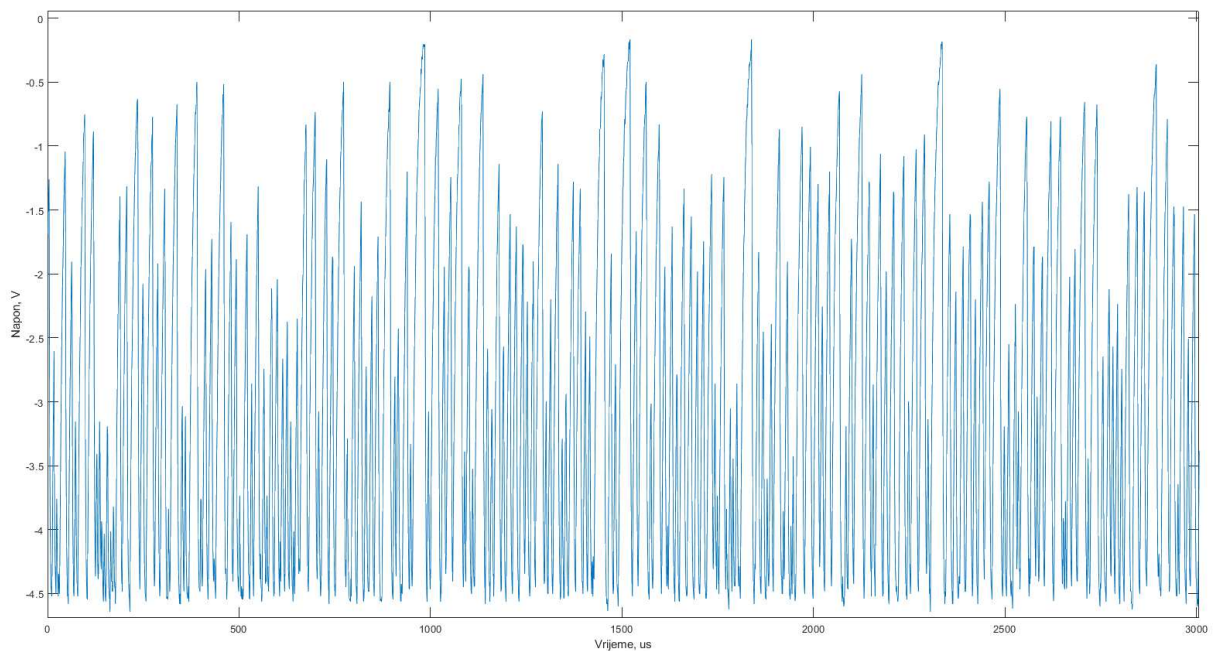
Slika 2.15 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 1. SPAD uz $V_{EX} = 1 \text{ V}$



Slika 2.16 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 1. SPAD uz $V_{EX} = 3 \text{ V}$

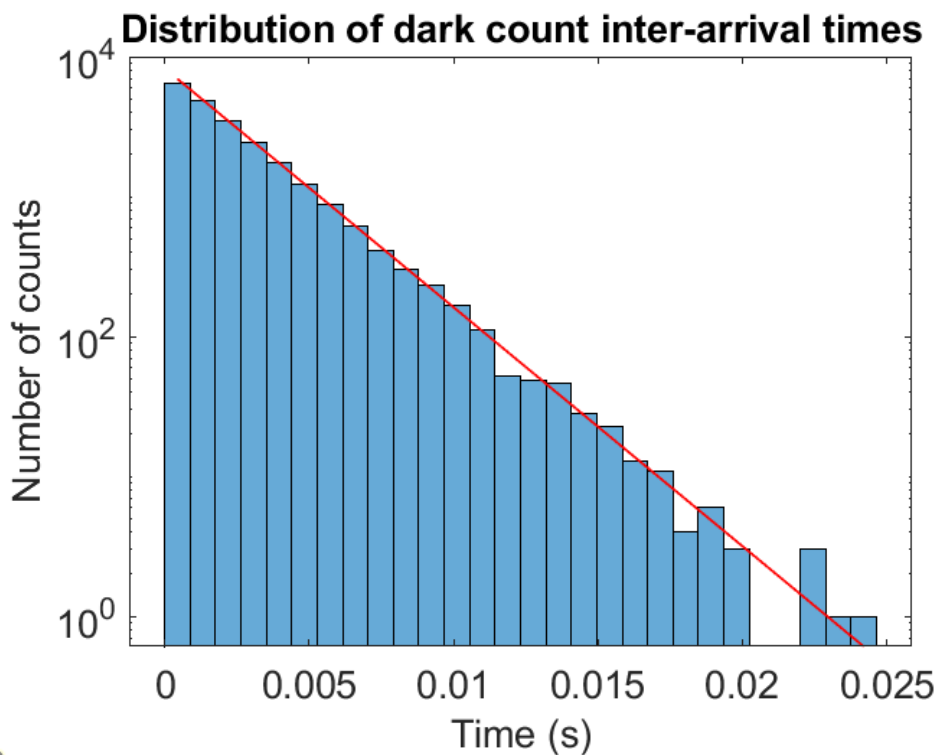


Slika 2.17 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 1. SPAD uz $V_{EX} = 4 \text{ V}$

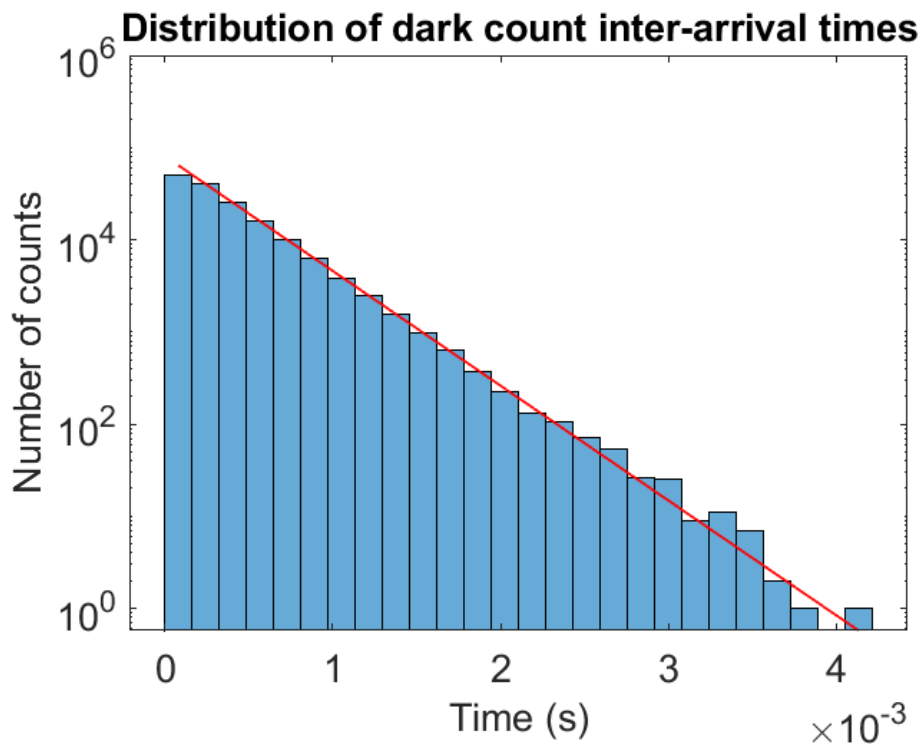


Slika 2.18 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 1. SPAD uz $V_{EX} = 5 \text{ V}$

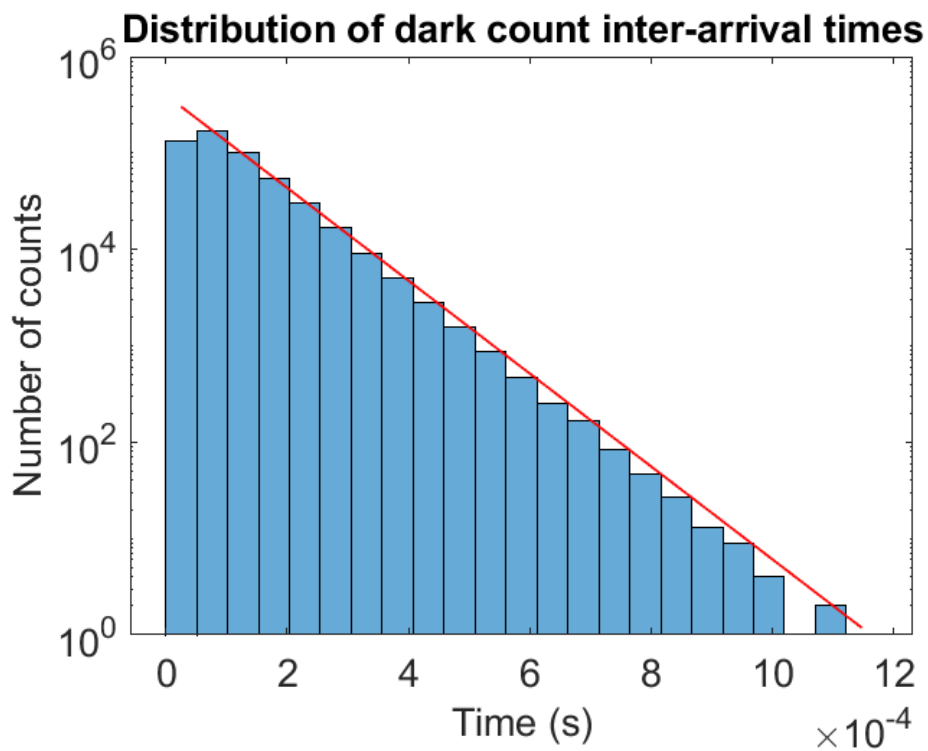
U nastavku su prikazani histogrami za različite napone viška prvoga SPAD-a (Slika 2.19, Slika 2.20, Slika 2.21, Slika 2.22 te Slika 2.23). Kao što je prije spomenuto, u histogramima postoji pravac koji predstavlja granicu između pojava tamnih impulsa koji nisu naknadna pulsiranja (površina ispod pravca) te broj naknadnih pulsiranja (površina iznad pravca). U većini slučajeva stupci dobro prate aproksimirani pravac što znači da nije dolazilo do mnogo naknadnih pulsiranja. Izuzetak je većinom prvi stupac kod kojeg je ipak vidi da je uistinu došlo do naknadnih pulsiranja. U nekim od prikazanih histograma prvi ili prvih nekoliko stupaca ne dostiže visinu stupca predviđenu aproksimiranim pravcem. To se događa upravo zbog prethodno spomenute pojave kada se tamni impulsi javljaju u mrtvom vremenu, što je i razlog negativnih vrijednosti naknadnog pulsiranja dobivenih mjerenjem. Slučajevima kada je stupac viši od aproksimiranog pravca ukazuju na to da je uistinu došlo do naknadnih pulsiranja.



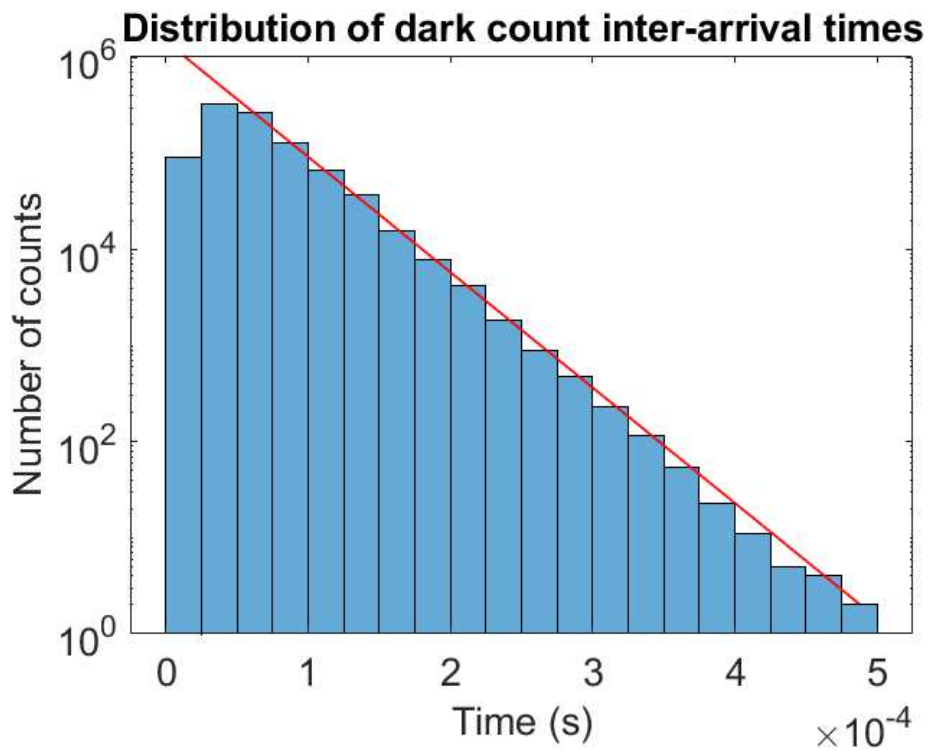
Slika 2.19 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 1. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



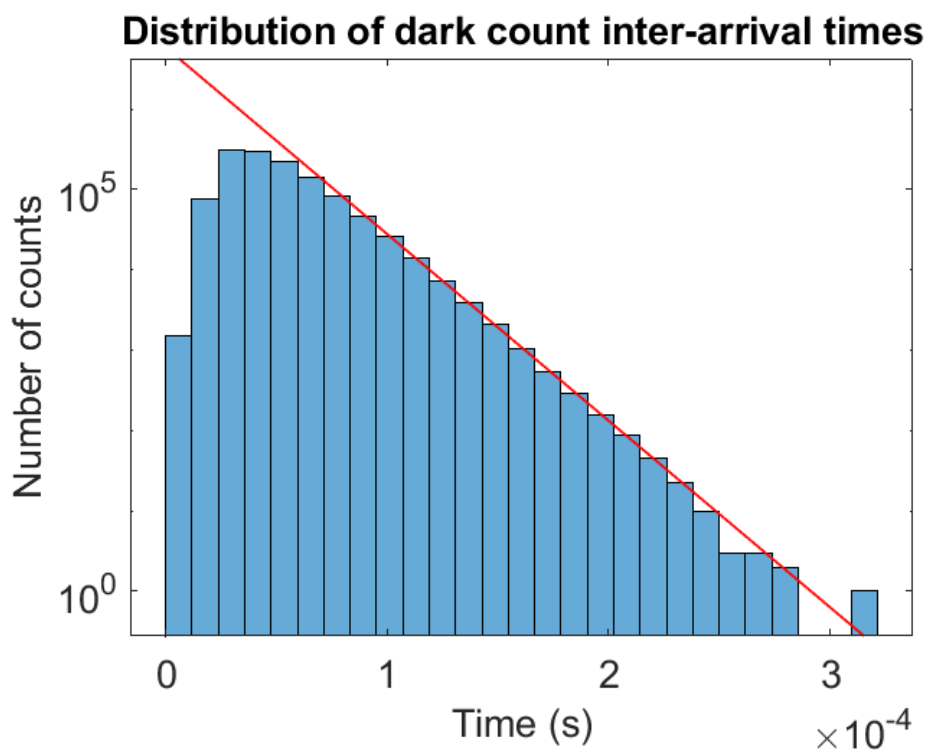
Slika 2.20 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 1. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.21 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 1. SPAD uz $V_{EX} = 3$ V



Slika 2.22 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 1. SPAD uz $V_{EX} = 4$ V



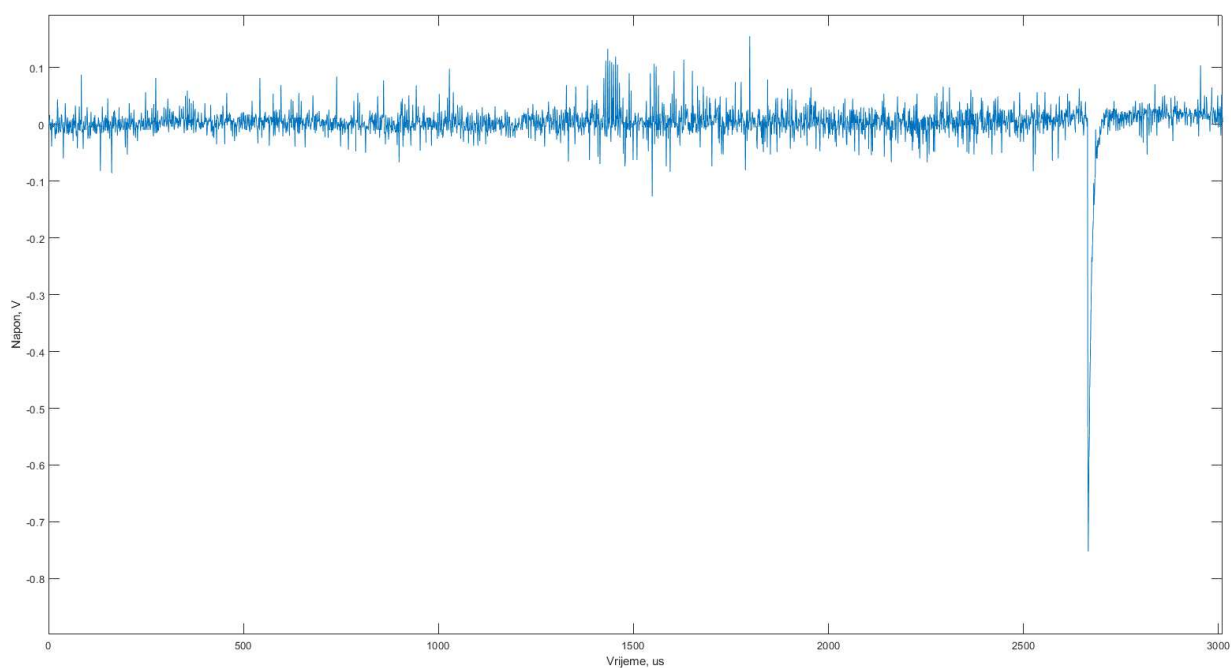
Slika 2.23 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 1. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

Zatim slijede rezultati mjerenja drugog SPAD-a čiji probojni napon iznosi 90.0 V. U odnosu na prvi SPAD, kod ovog je dodano slabo dopirano područje N4. Zbog jače dopiranog područja N2 koje graniči sa slabije dopiranim područjem N4, može se pretpostaviti da će doći do pojave difuzije između ta dva područja. Povećanje koncentracije u okolici pn-spoja za posljedicu ima smanjenje širine osiromašenog područja. Smanjenje širine osiromašenog područja uzrokuje smanjenje probojnog napona. U usporedbi sa probojnim naponom prvoga SPAD-a, probojni napon drugoga se uistinu jest smanjio, no razlika nije velika. Drugi mogući uzroci promjene probojnog napona su različita temperatura na kojoj se mjerilo zbog toga što se nisu svi SPAD-ovi mjerili u isto vrijeme te mogući defekti na čipu. U tablici (Tablica 5) su prikazane vrijednosti DCR-a te postotak pojave naknadnog pulsiranja za svih pet različitih napona viška. Vidi se da se DCR povećava s povećanjem napona viška, no to povećanje nije posve linearno. Naknadno pulsiranje se ne povećava s povećanjem napona viška.

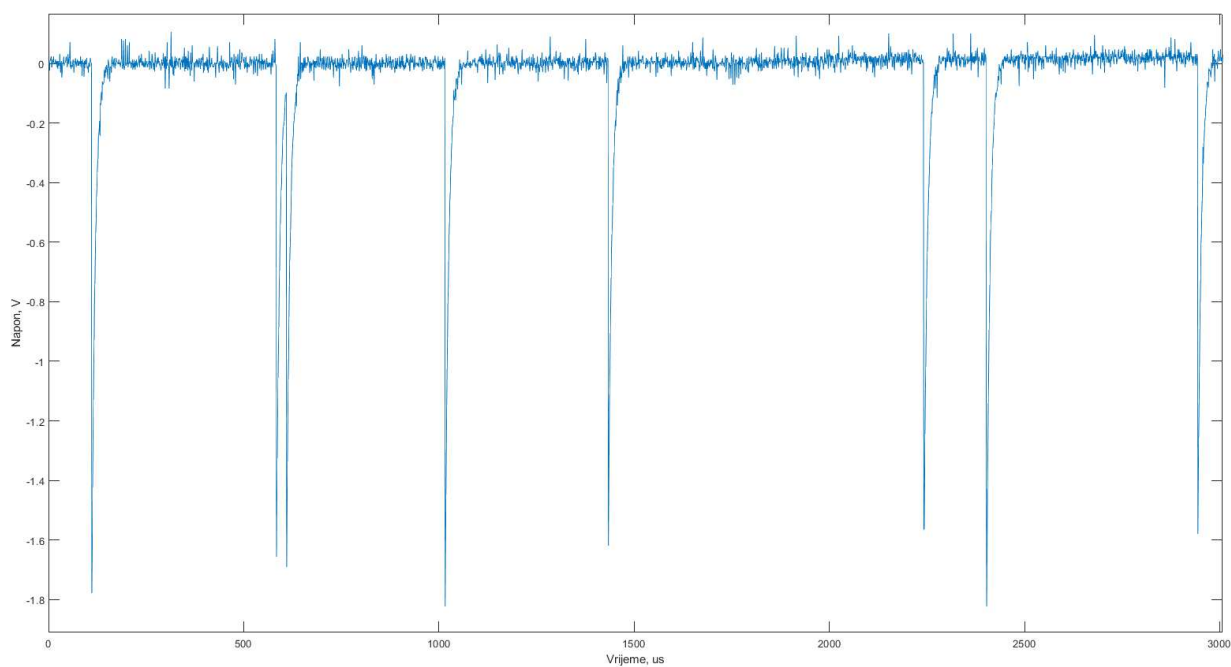
Tablica 5 DCR i naknadno pulsiranje za 2. SPAD za različite priključene napone, odnosno napone viška

Priključeni napon V_B	Napon viška V_{EX}	DCR, Hz	Pojava naknadnog pulsiranja, %
$V_B = 91.0 \text{ V}$	$V_{EX} = 1 \text{ V}$	213.58	-0.25
$V_B = 92.0 \text{ V}$	$V_{EX} = 2 \text{ V}$	1175.3	-1.64
$V_B = 93.0 \text{ V}$	$V_{EX} = 3 \text{ V}$	9697.3	89.85
$V_B = 94.0 \text{ V}$	$V_{EX} = 4 \text{ V}$	16852	9.73
$V_B = 95.0 \text{ V}$	$V_{EX} = 5 \text{ V}$	22647	-47.59

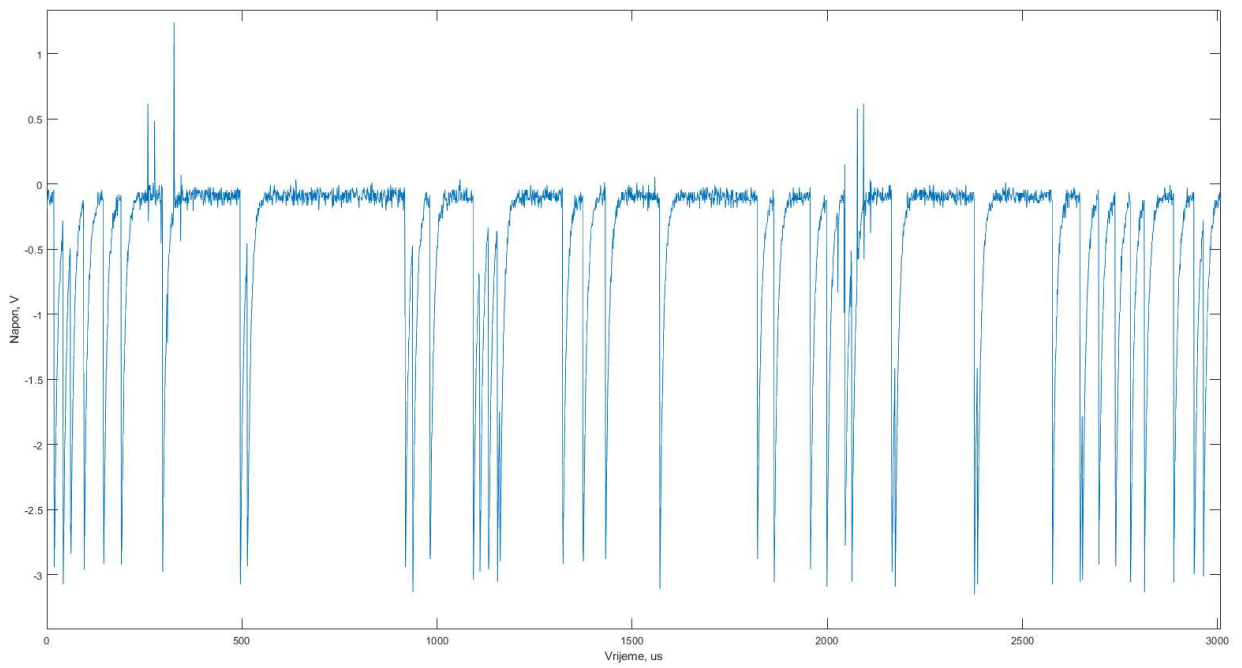
Slijede grafovi koji prikazuju pojave tamnih impulsa u istom vremenskom intervalu za različite napone viška drugog SPAD-a (Slika 2.24, Slika 2.25, Slika 2.26, Slika 2.27 te Slika 2.28). I za ovaj se SPAD u grafovima vidi povećanje pojave tamnih impulsa sa porastom napona viška. Također, vidi se da se kod ovog SPAD-a tamni impulsi u mrtvom vremenu počinju javljati tek za napon viška iznosa 3 V, što je veći napon viška nego kod prvoga SPAD-a.



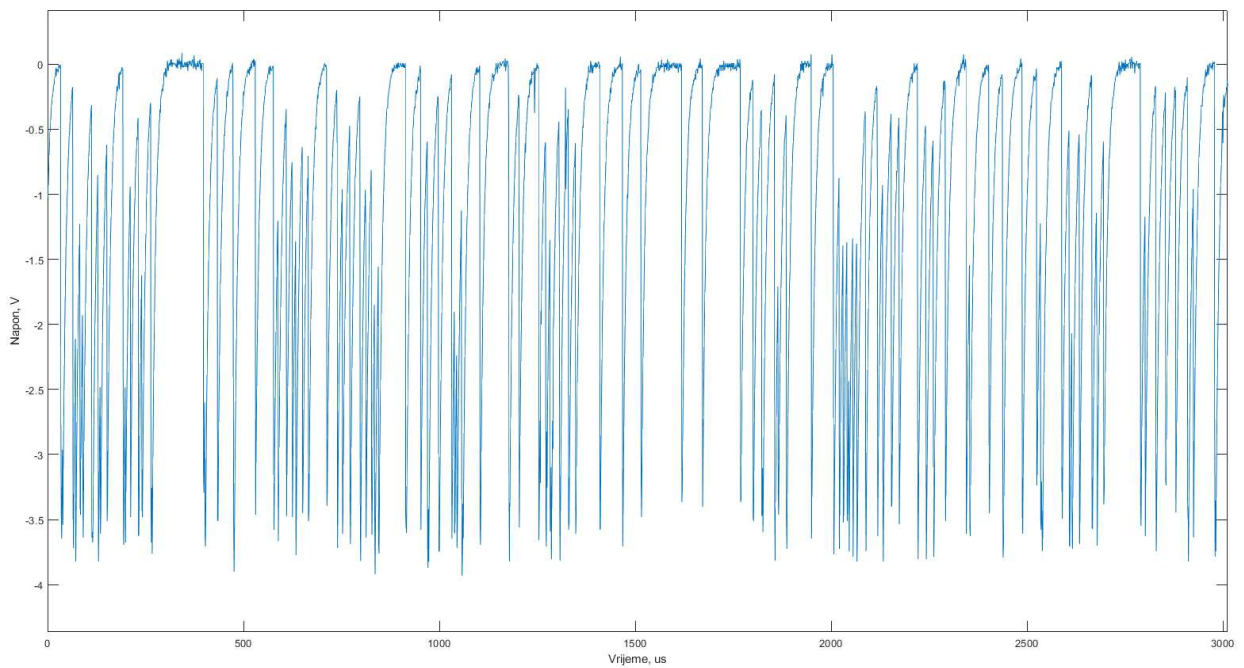
Slika 2.24 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 2. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



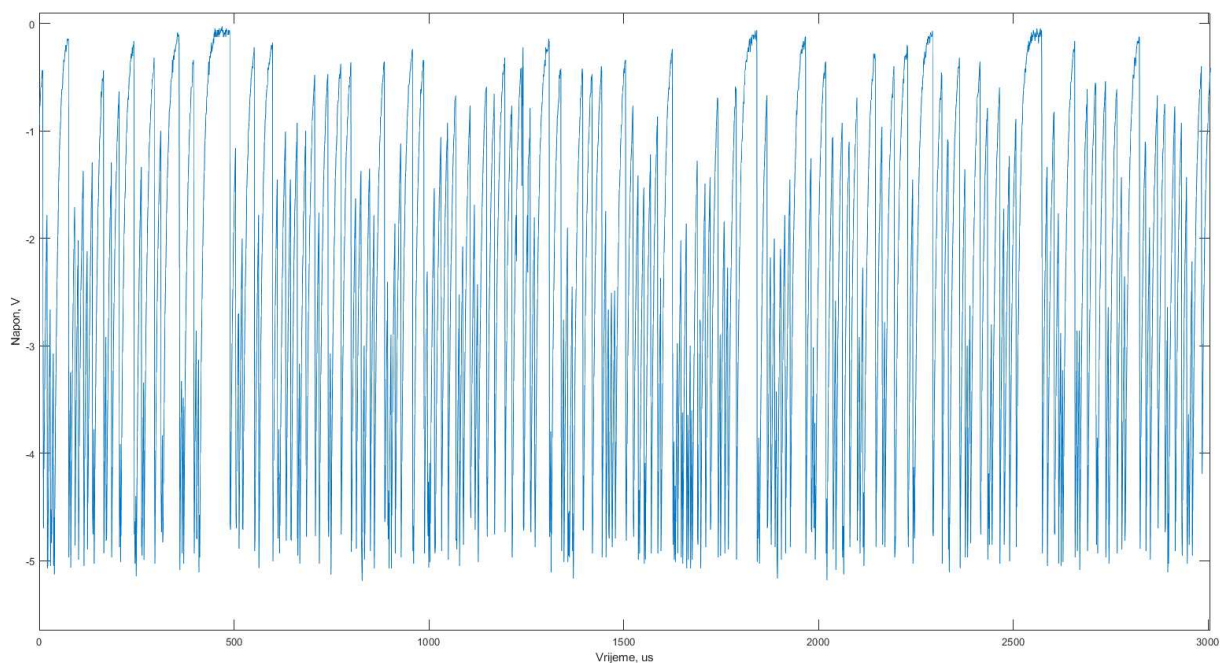
Slika 2.25 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 2. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.26 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 2. SPAD uz $V_{EX} = 3 \text{ V}$

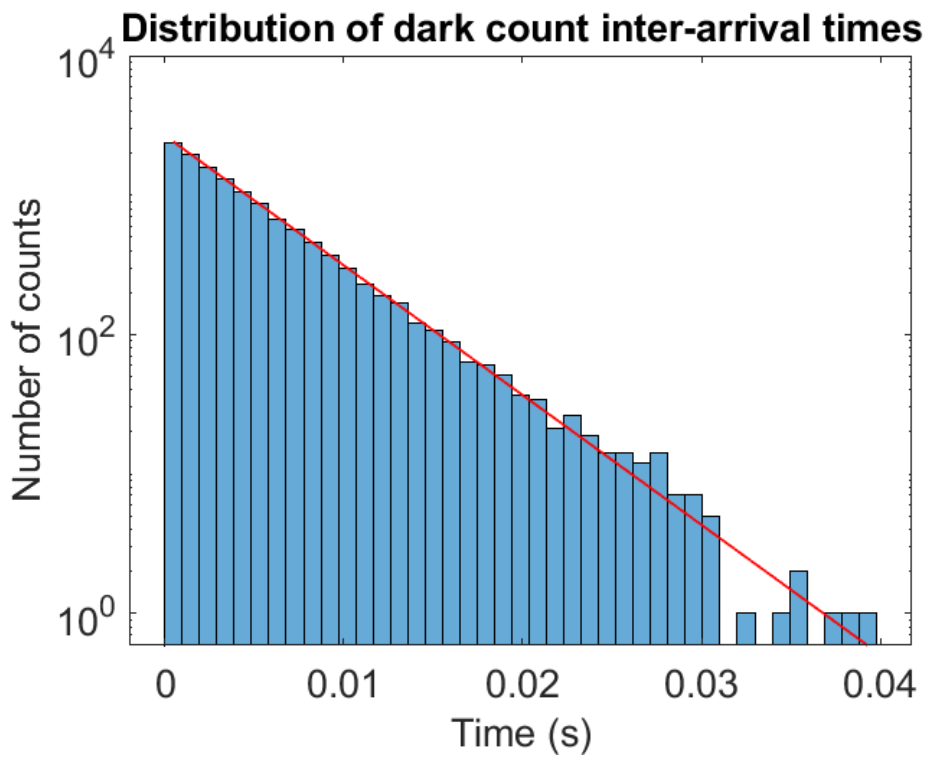


Slika 2.27 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 2. SPAD uz $V_{EX} = 4 \text{ V}$

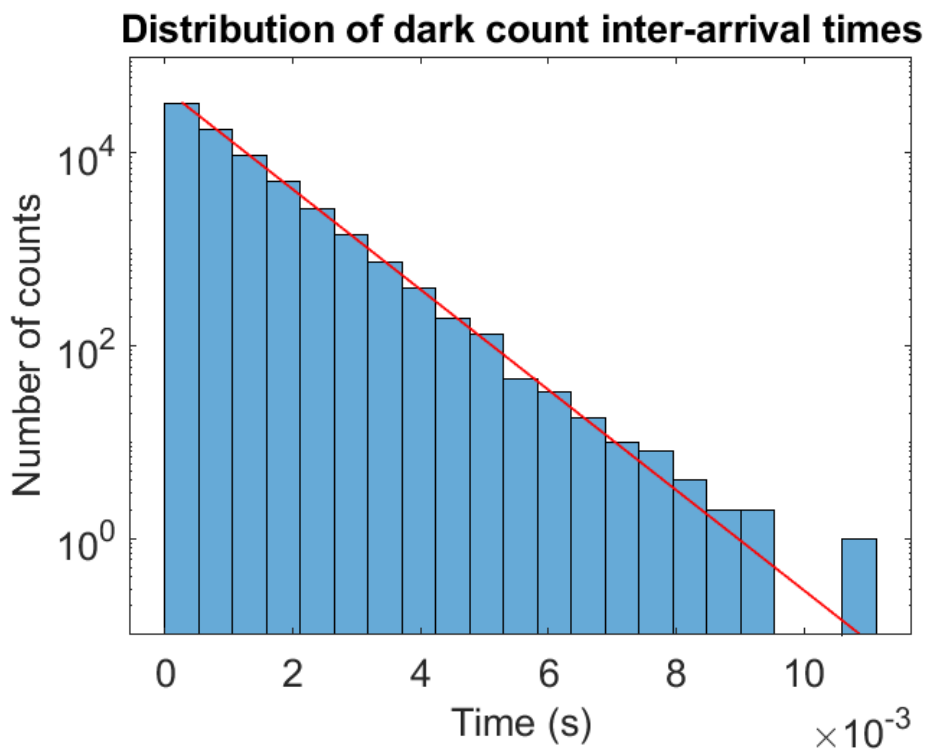


Slika 2.28 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 2. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

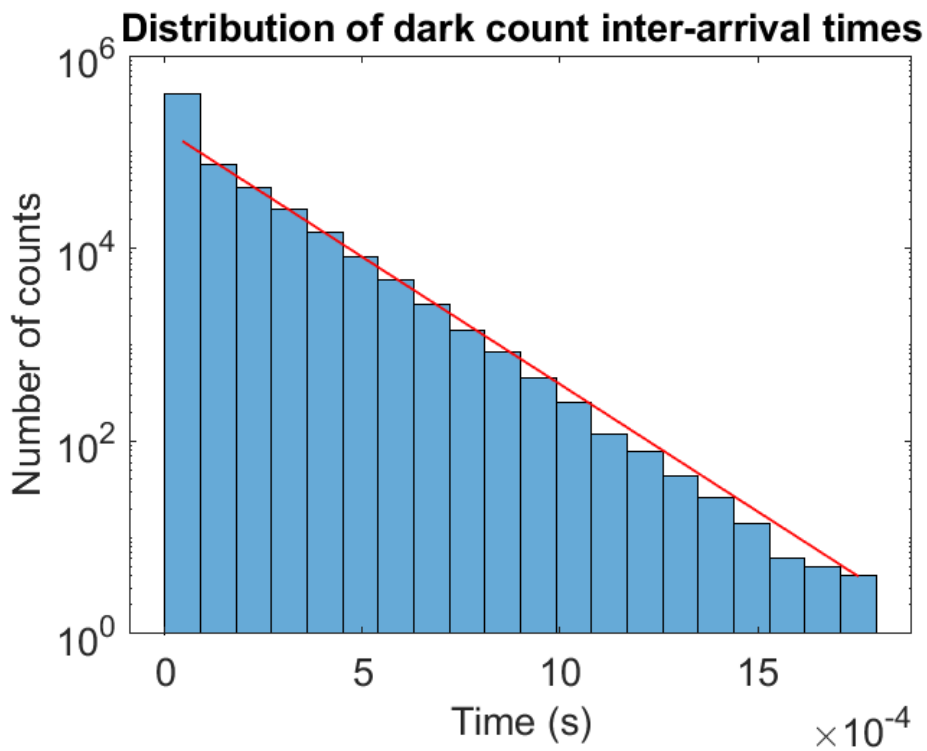
Zatim su prikazani histogrami za različite napone viška drugoga SPAD-a (Slika 2.29, Slika 2.30, Slika 2.31, Slika 2.32 te Slika 2.33). I u ovom se slučaju vidi dobra aproksimacija broja tamnih impulsa sa pravcem. Kod ovog SPAD-a također postoje negativne vrijednosti naknadnog pulsiranja do koji dolazi zbog pojave tamnih impulsa u mrtvom vremenu. Taj se nedostatak visine stupca u odnosu na aproksimirani pravac vrlo dobro vidi za $V_{EX}=5$ V. U rezultatima mjerenja ovog SPAD-a postoje je i pozitivne vrijednosti naknadnog pulsiranja za $V_{EX}=3$ V te $V_{EX}=4$ V što znači da je češće dolazilo do naknadnih pulsiranja izvan mrtvog vremena nego tamnih impulsa u mrtvom vremenu. Pojava naknadnih pulsiranja vidi se u histogramu (Slika 2.31) za $V_{EX}=3$ V kao površina stupca iznad aproksimiranog pravca.



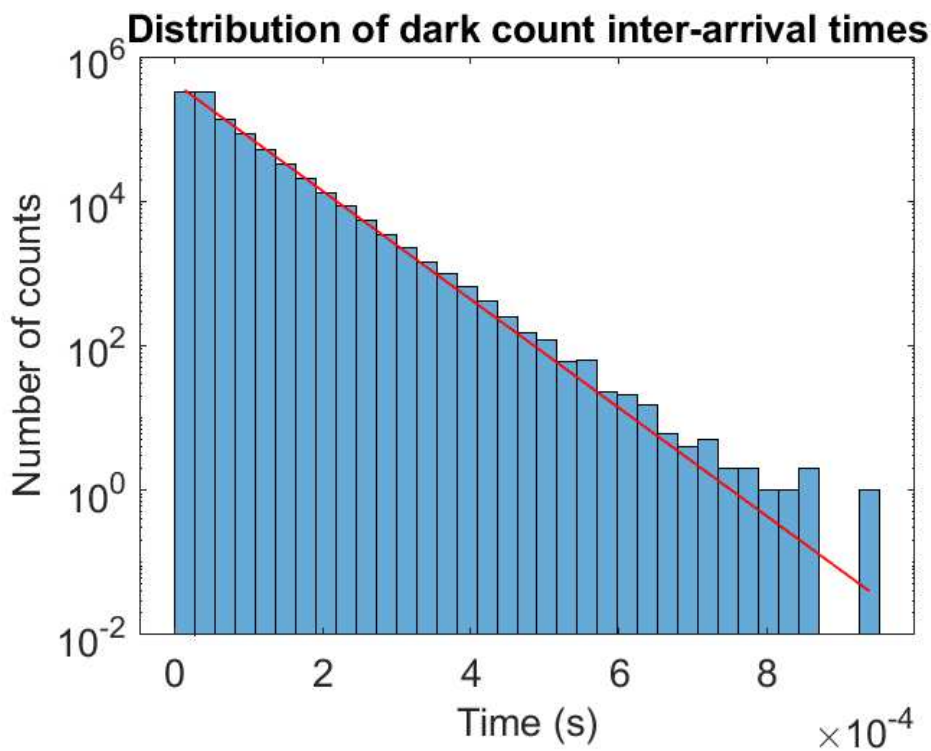
Slika 2.29 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 2. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



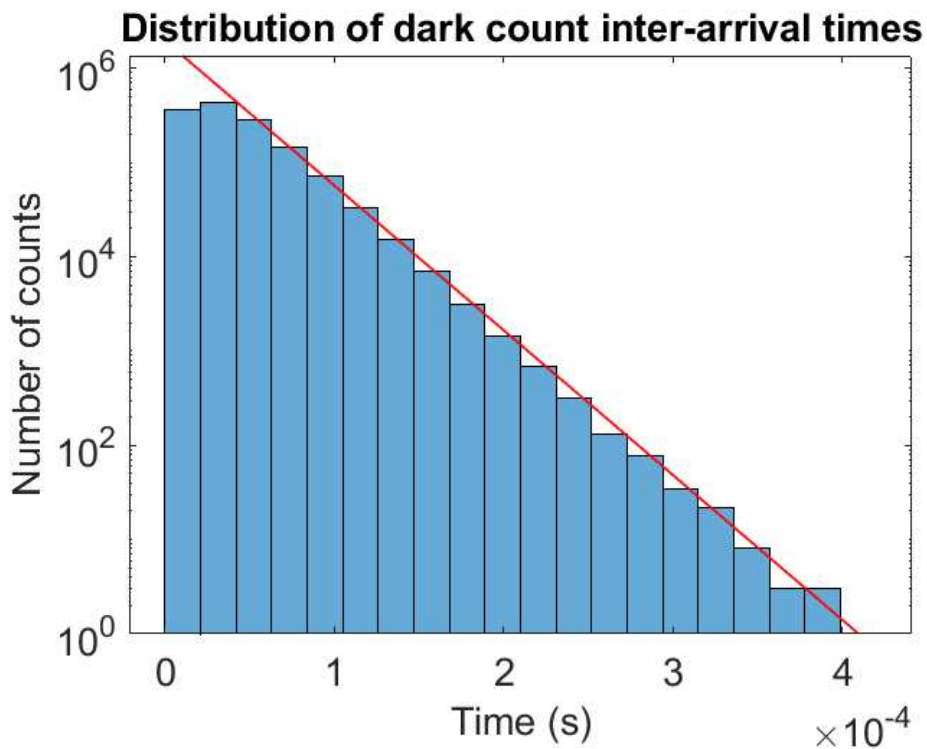
Slika 2.30 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 2. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.31 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 2. SPAD uz $V_{EX} = 3$ V



Slika 2.32 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 2. SPAD uz $V_{EX} = 4$ V



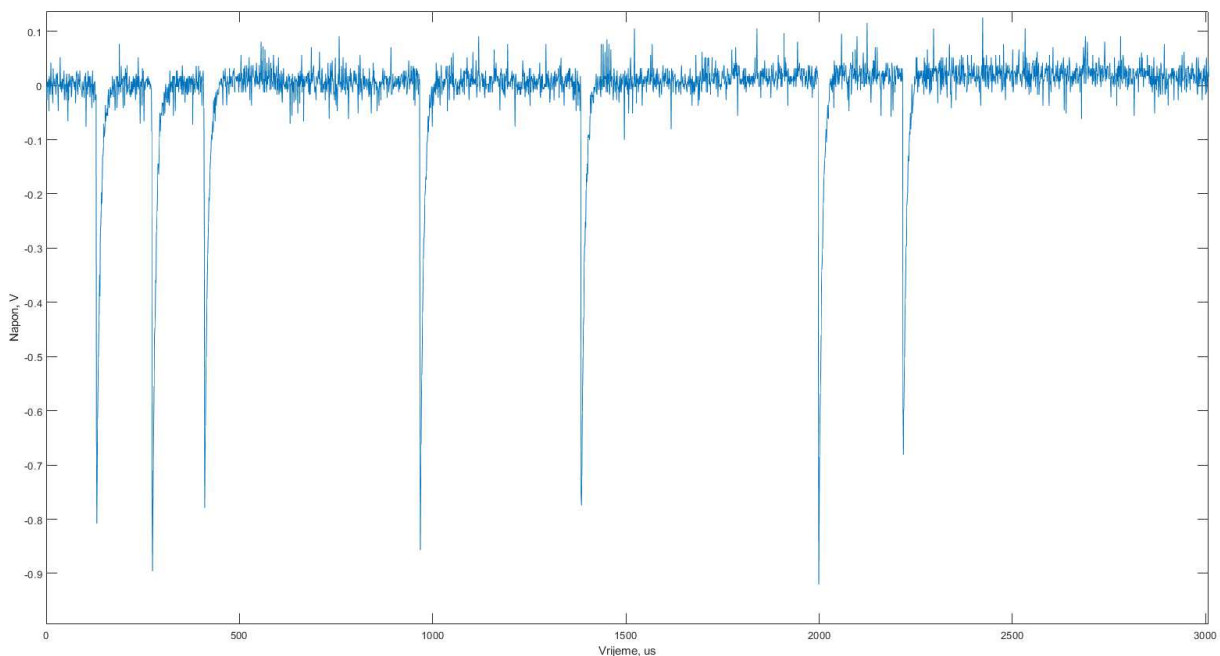
Slika 2.33 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 2. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

U nastavku slijede rezultati mjerenja trećeg SPAD-a čiji probojni napon iznosi 93.2 V. U usporedbi sa prvim SPAD-om, ovaj nema *poly spacer*, a sve ostalo je isto. Postojanje *poly spacer*-a odvaja katodu SPAD-a od ostatka te smanjuje pojavu površinskih defekata što bi trebalo smanjiti pojave tamnih impulsa. Nema velike razlike između napona proboja ovoga SPAD-a u odnosu na prvi SPAD, što znači da postojanje *poly spacer*-a nema neki utjecaj na probojni napon. Također, i u ovom je slučaju moglo doći do promjene probojnog napona u odnosu na prvi zbog različitih temperatura na kojoj se mjerilo zbog toga što se nisu svi SPAD-ovi mjerili u isto vrijeme te mogućih defekata na čipu. U tablici (Tablica 6) prikazane su vrijednosti DCR-a te postotak pojave naknadnog pulsiranja za svih pet različitih napona viška. I u ovom se slučaju DCR povećava s povećanjem priključenog napona viška, no ne posve linearno. Iznosi naknadnog pulsiranja za ovaj SPAD su negativni što ukazuje na to da je dolazilo do pojave tamnih impulsa u mrtvom vremenu. Naknadno pulsiranje u ovom slučaju raste sa povećanjem napona viška.

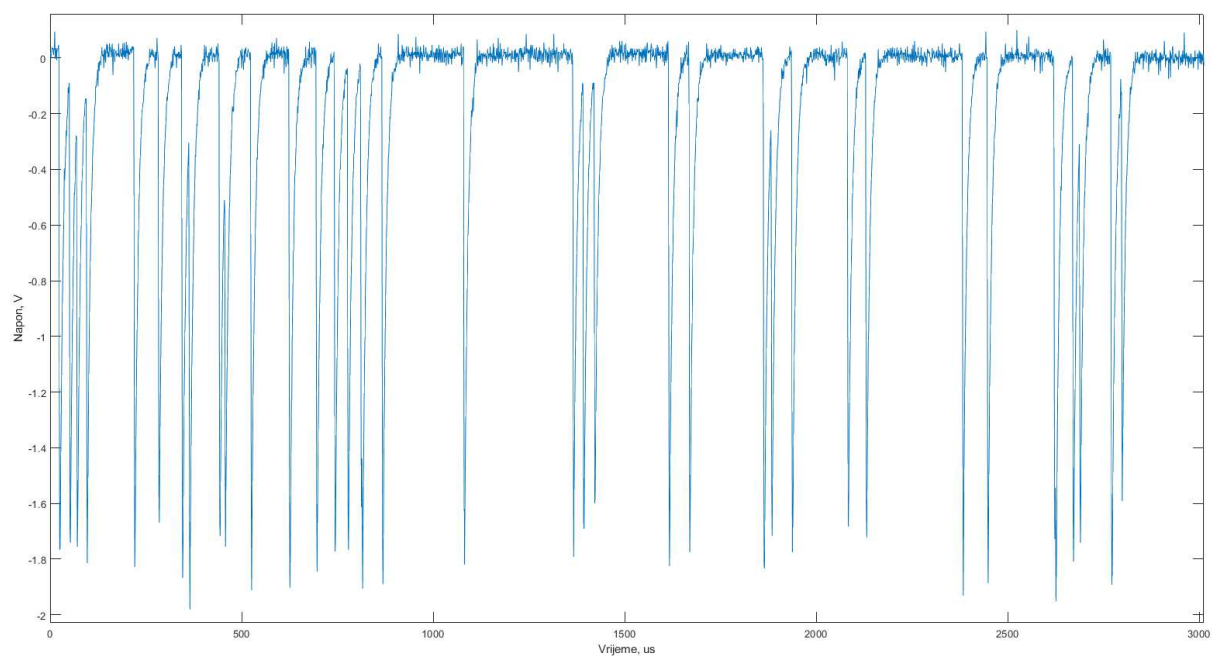
Tablica 6 DCR i naknadno pulsiranje za 3. SPAD za različite priključene napone, odnosno napone viška

Priključeni napon V_B	Napon viška V_{EX}	DCR, Hz	Pojava naknadnog pulsiranja, %
$V_B = 94.2 \text{ V}$	$V_{EX} = 1 \text{ V}$	565.28	-3.33
$V_B = 95.2 \text{ V}$	$V_{EX} = 2 \text{ V}$	3235.7	-4.86
$V_B = 96.2 \text{ V}$	$V_{EX} = 3 \text{ V}$	9868.2	-19.66
$V_B = 97.2 \text{ V}$	$V_{EX} = 4 \text{ V}$	17073	-48.67
$V_B = 98.2 \text{ V}$	$V_{EX} = 5 \text{ V}$	22111	-78.78

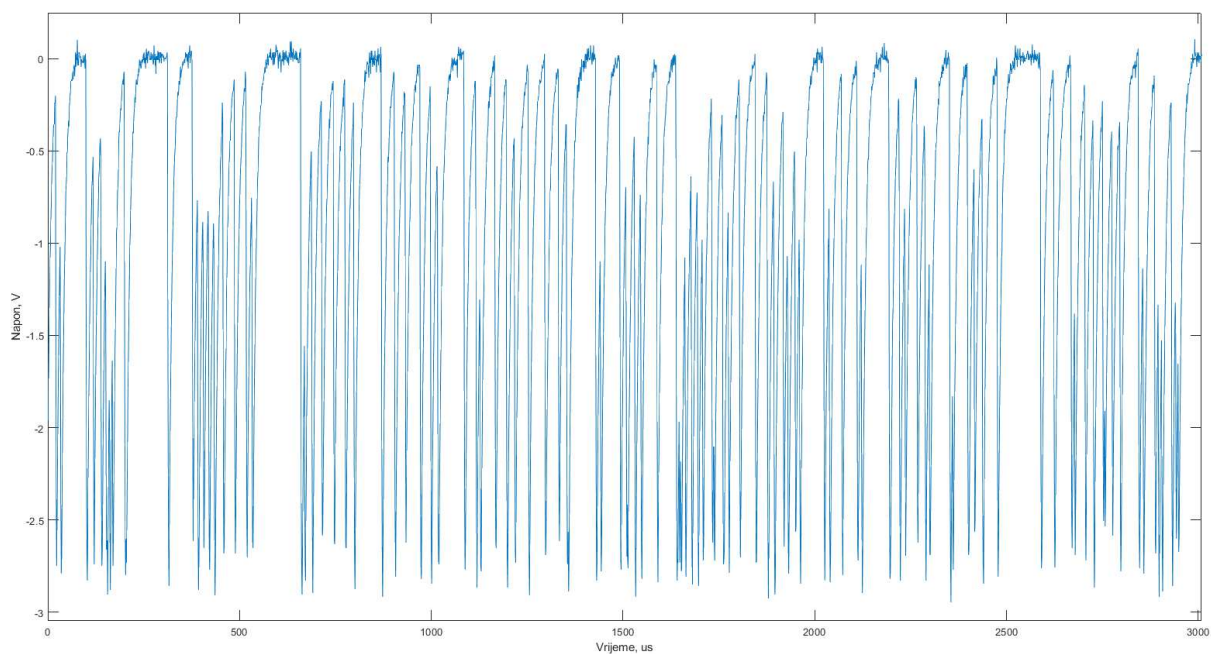
Slijede grafovi koji prikazuju pojave tamnih impulsa u istom vremenskom intervalu za različite napone viška trećega SPAD-a (Slika 2.34, Slika 2.35, Slika 2.36, Slika 2.37 i Slika 2.38). Za ovaj se SPAD također u grafovima vidi povećanje pojava tamnih impulsa sa porastom napona viška.



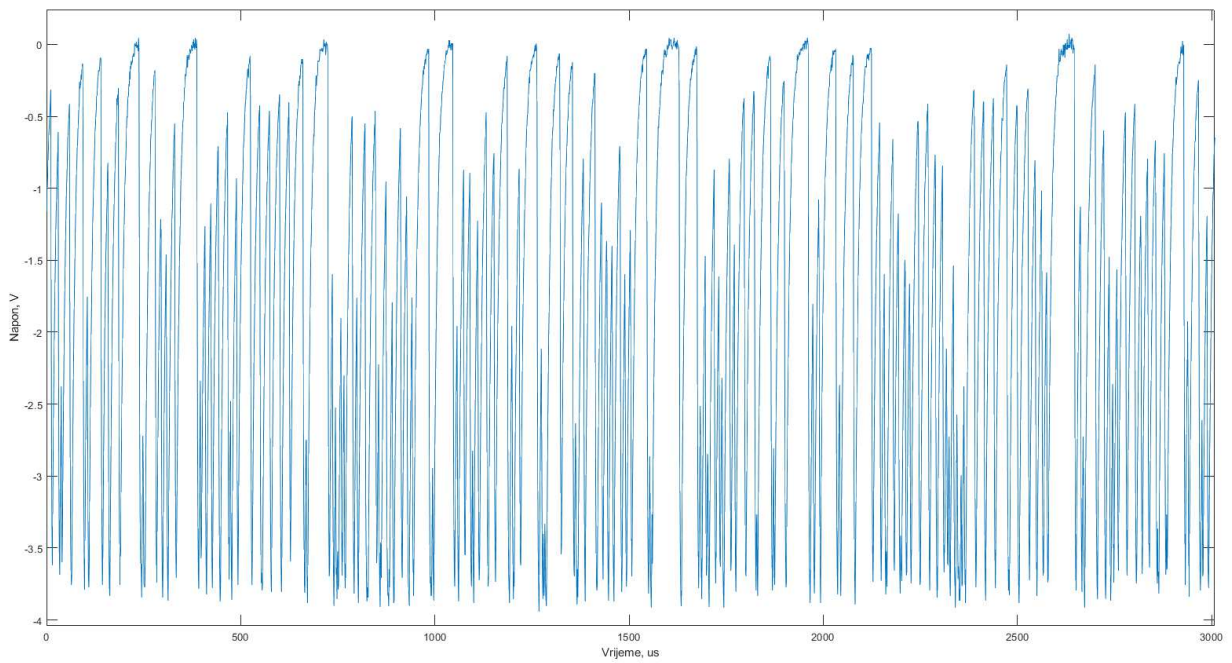
Slika 2.34 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 3. SPAD uz $V_{EX} = 1 \text{ V}$



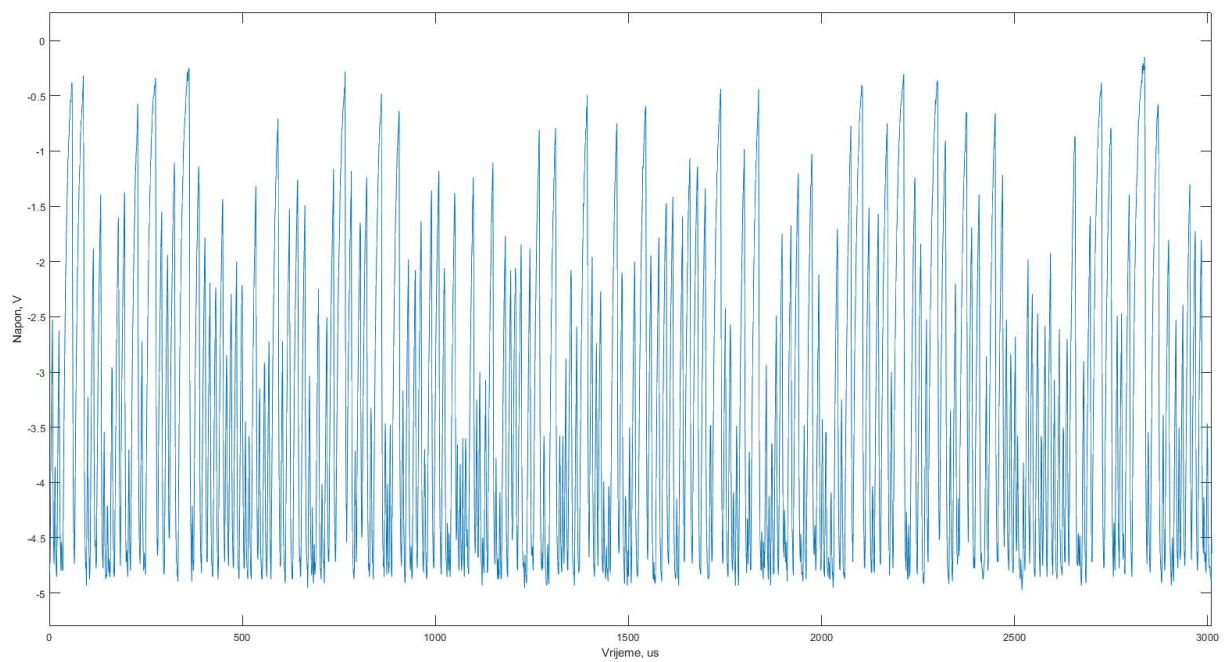
Slika 2.35 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 3. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.36 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 3. SPAD uz $V_{EX} = 3$ V

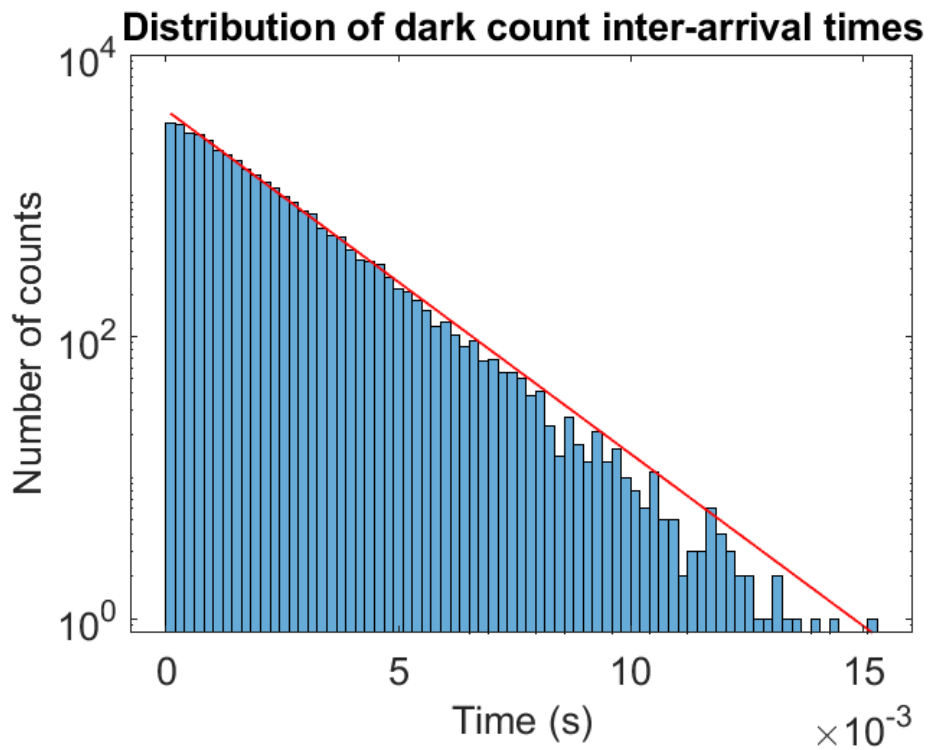


Slika 2.37 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 3. SPAD uz $V_{EX} = 4 \text{ V}$

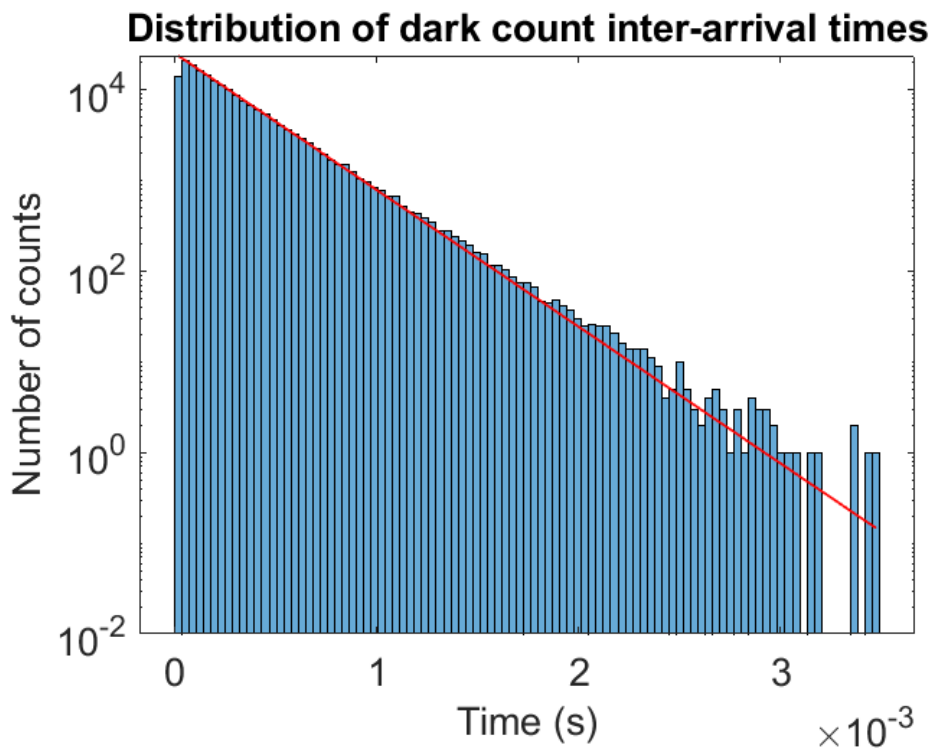


Slika 2.38 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 3. SPAD uz $V_{EX} = 5 \text{ V}$

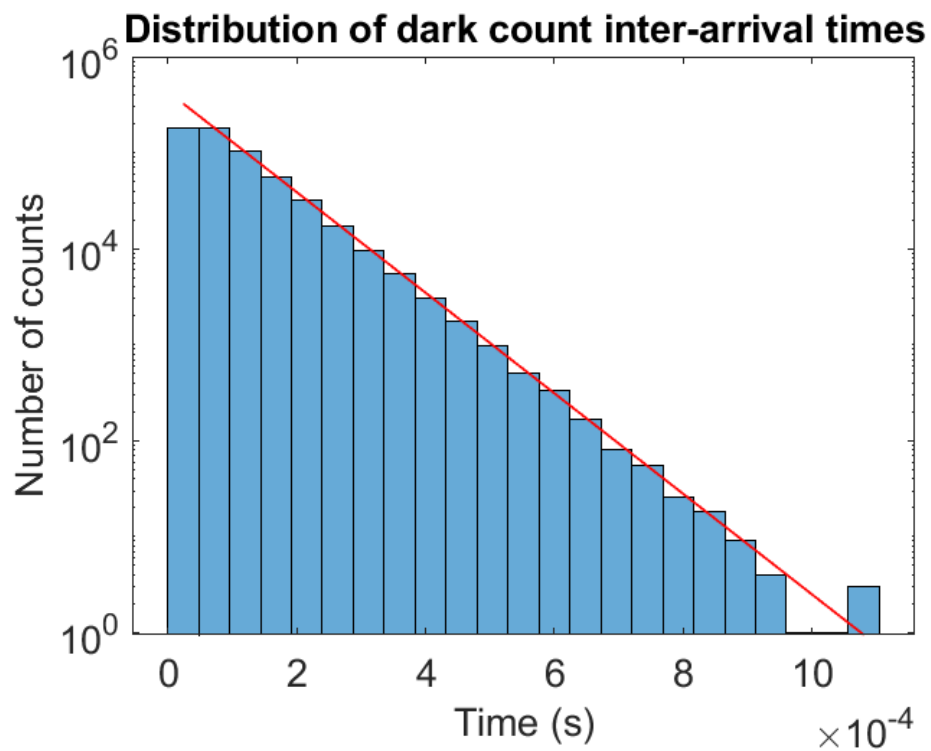
Zatim su prikazani histogrami za različite napone viška trećega SPAD-a. Zbog negativnih iznosa naknadnih impulsa očekuje se da ni u jednom histogramu prvi ili prvih nekoliko stupaca ne doseže visinu određenu aproksimiranim pravcem, što se doista i vidi u histogramima.



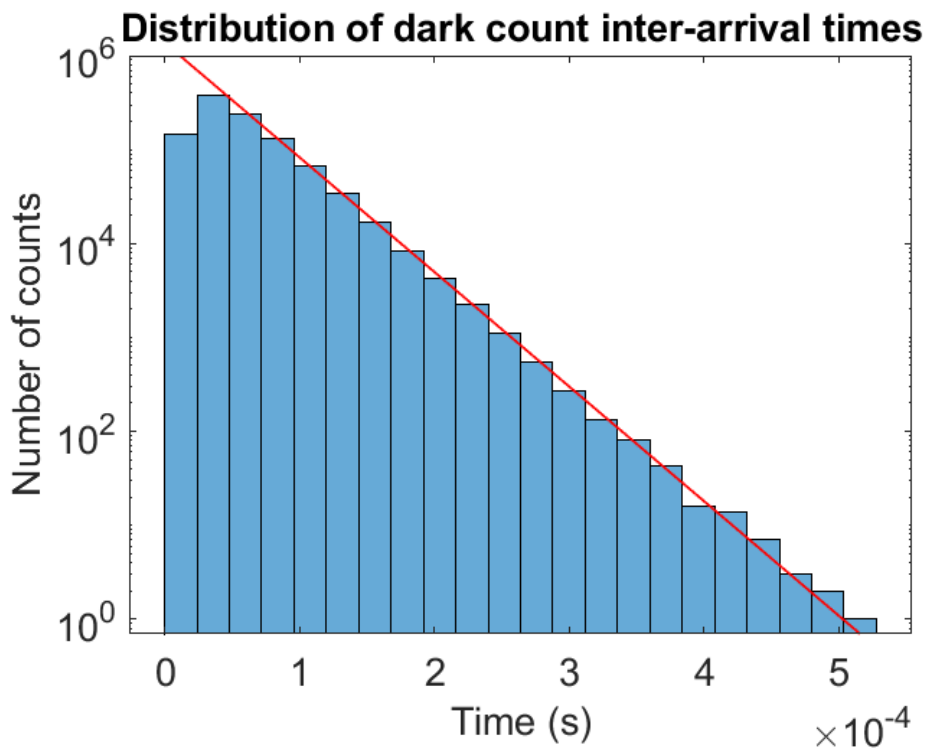
Slika 2.39 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 3. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



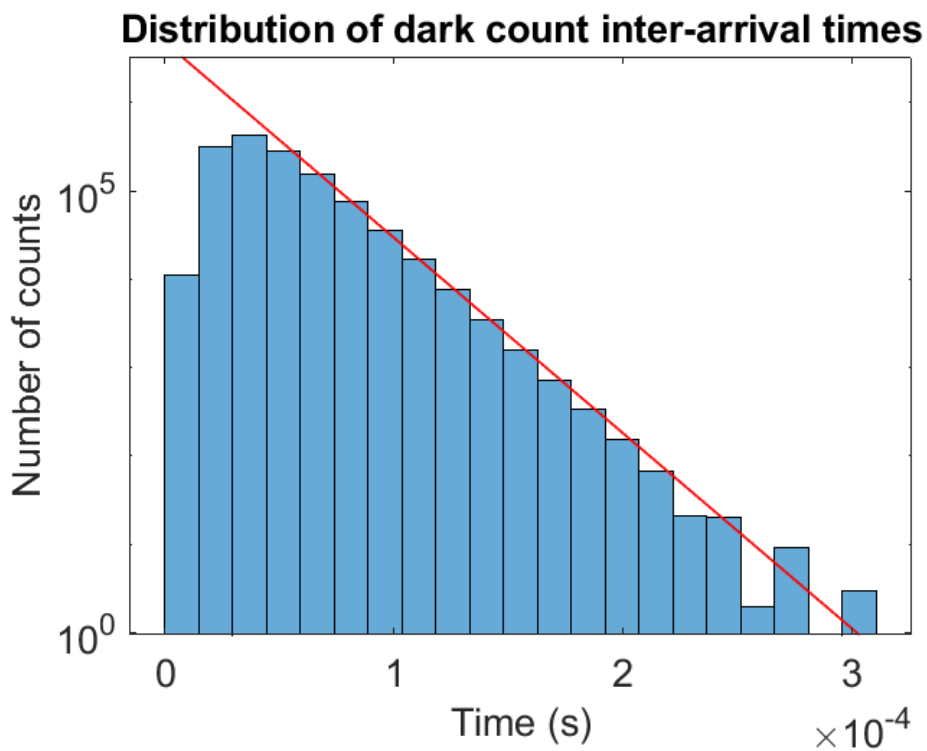
Slika 2.40 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 3. SPAD uz $V_{EX} = 2\text{ V}$



Slika 2.41 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 3. SPAD uz $V_{EX} = 3\text{ V}$



Slika 2.42 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 3. SPAD uz $V_{EX} = 4$ V



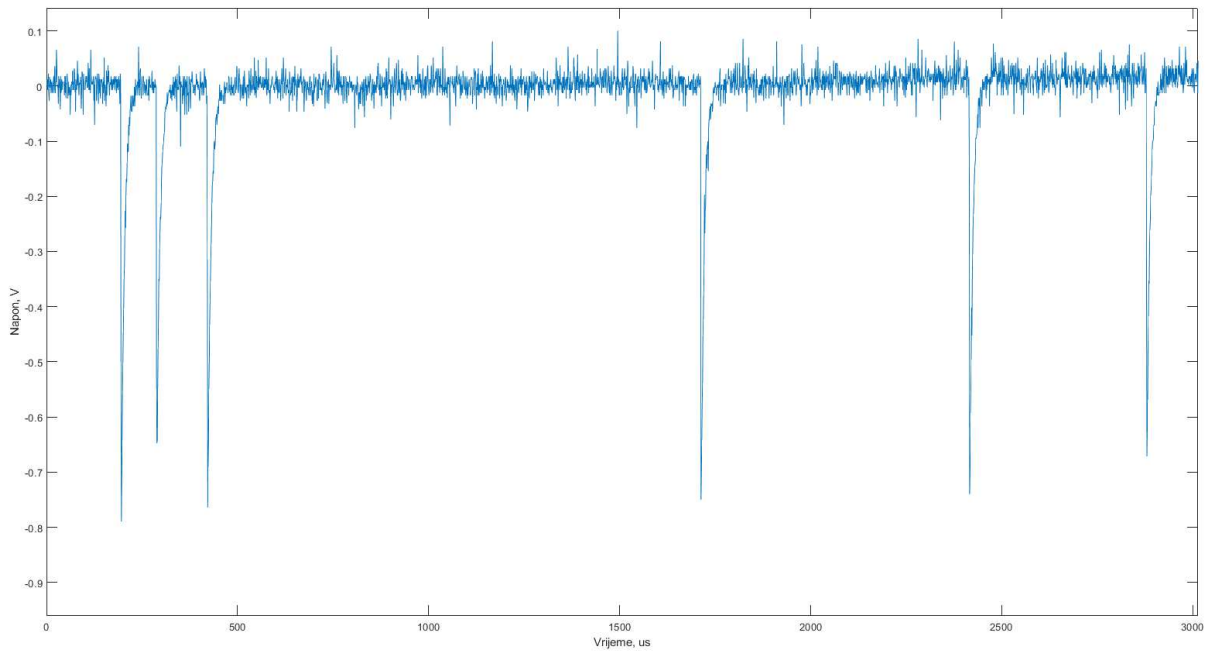
Slika 2.43 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 3. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

U nastavku slijede rezultati mjerenja četvrtog SPAD-a čiji probojni napon iznosi 91.7 V. U odnosu na prvi SPAD, kod ovoga je područje P2 poravnato sa područjem N1. To rezultira većim aktivnim područjem. Zbog povećanja jako dopiranih područja, smanjuje se širina osiromašenog sloja zbog čega se očekuje smanjenje probojnog napona u odnosu na prvi SPAD. I u ovom je slučaju mala razlika između probojnog napona prvog i četvrtog SPAD-a što se, osim zbog prethodno navedenog razloga, moglo dogoditi i zbog različitih temperatura na kojoj se mjerilo zbog toga što se nisu svi SPAD-ovi mjerili u isto vrijeme te mogućih defekata na čipu. U tablici (Tablica 7) prikazane su vrijednosti DCR-a te postotak pojave naknadnog pulsiranja za svih pet različitih napona viška. Kod ovog SPAD-a također je postoji porast DCR-a s povećanjem napona viška. Iz tablice se može vidjeti da su i kod ovog SPAD-a sve vrijednosti naknadnog pulsiranja negativne te rastu s povećanjem napona viška.

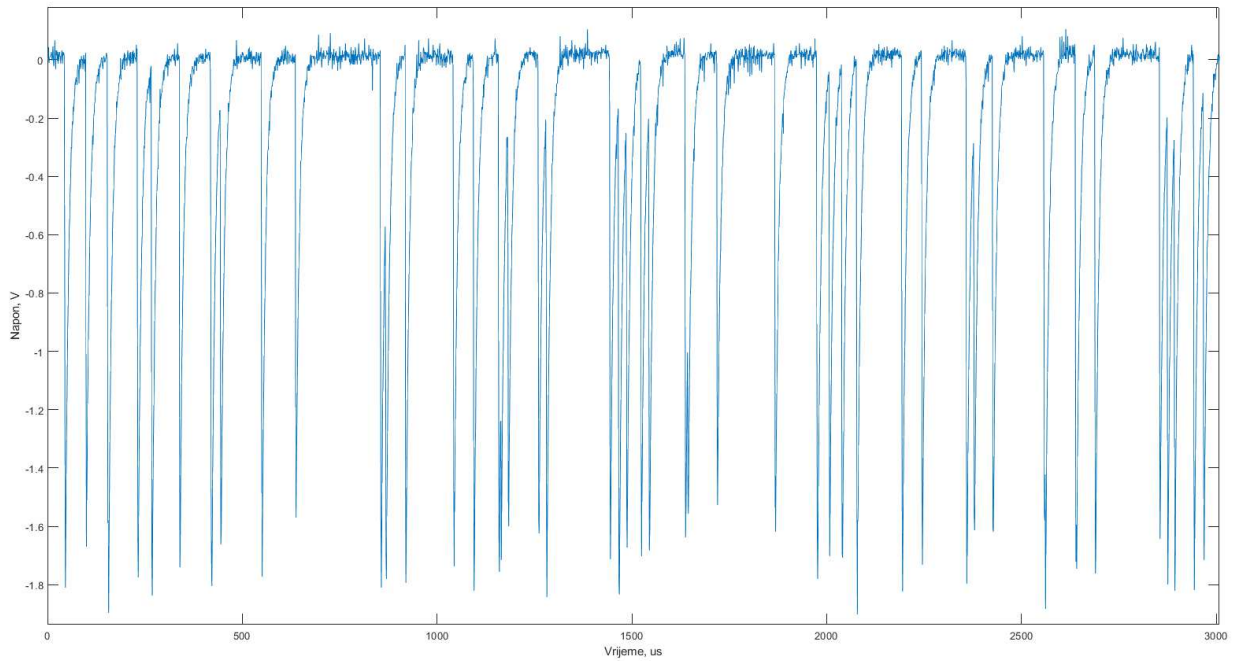
Tablica 7 DCR i naknadno pulsiranje za 4. SPAD za različite priključene napone, odnosno napone viška

Priključeni napon V_B	Napon viška V_{EX}	DCR, Hz	Pojava naknadnog pulsiranja, %
$V_B = 92.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 1 \text{ V}$	1048.3	-2.53
$V_B = 93.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 2 \text{ V}$	6312.6	-14.80
$V_B = 94.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 3 \text{ V}$	15306	-36.62
$V_B = 95.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 4 \text{ V}$	23916	-65.97
$V_B = 96.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 5 \text{ V}$	29234	-86.44

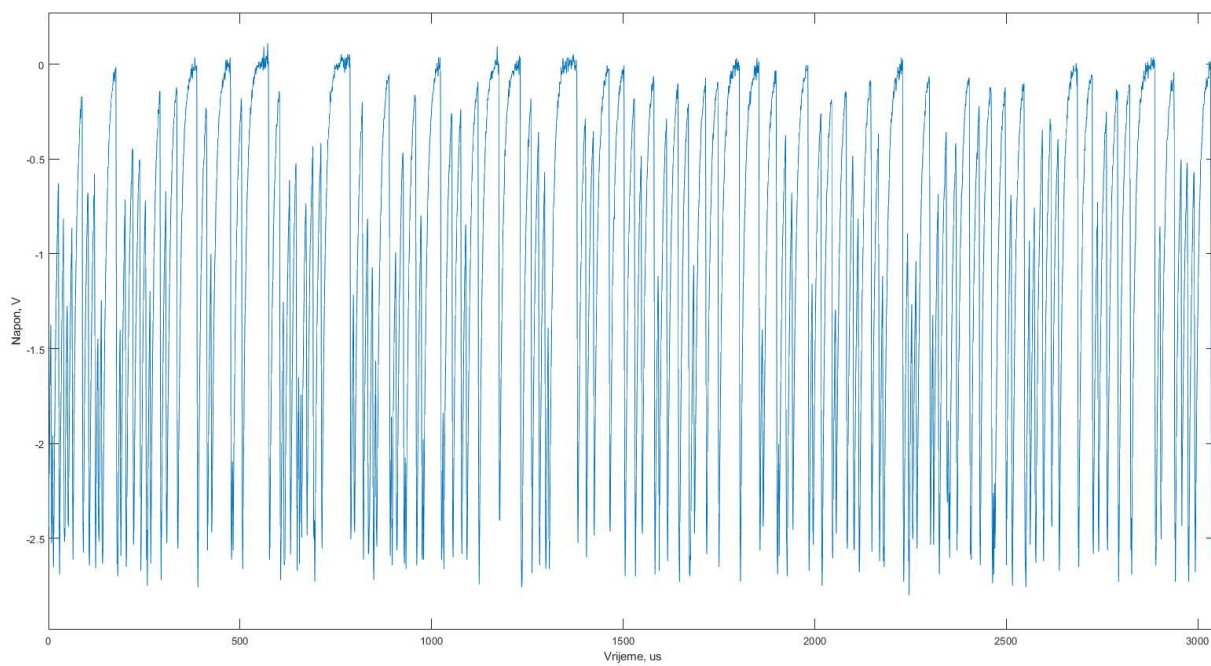
Slijede grafovi koji prikazuju pojave tamnih impulsa u istom vremenskom intervalu za različite napone viška četvrtog SPAD-a (Slika 2.44, Slika 2.45, Slika 2.46, Slika 2.47 te Slika 2.48). I za ovaj se SPAD u grafovima vidi povećanje pojava tamnih impulsa sa porastom napona viška. Također, vidi se da se kod ovog SPAD-a tamni impulsi u mrtvom vremenu počinju javljati već za napon viška iznosa 2 V, a za $V_{EX}=5 \text{ V}$ jedva se napon na SPAD-u ne stigne potisnuti prije dolaska sljedećeg tamnog impulsa.



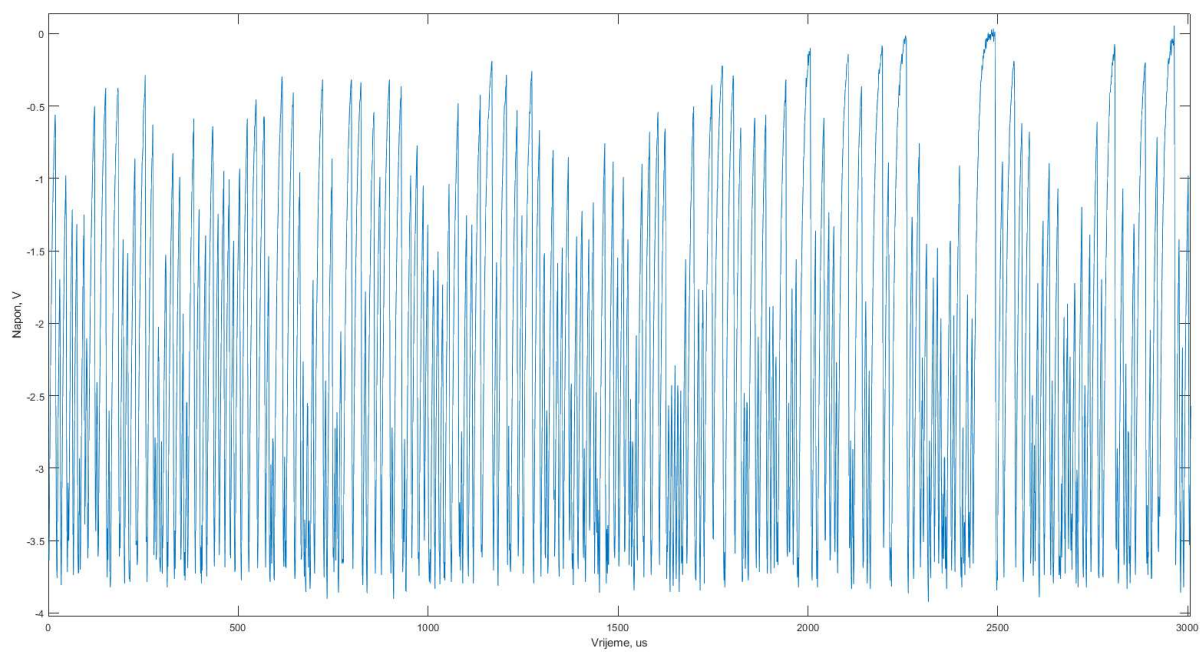
Slika 2.44 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 4. SPAD uz $V_{EX} = 1 \text{ V}$



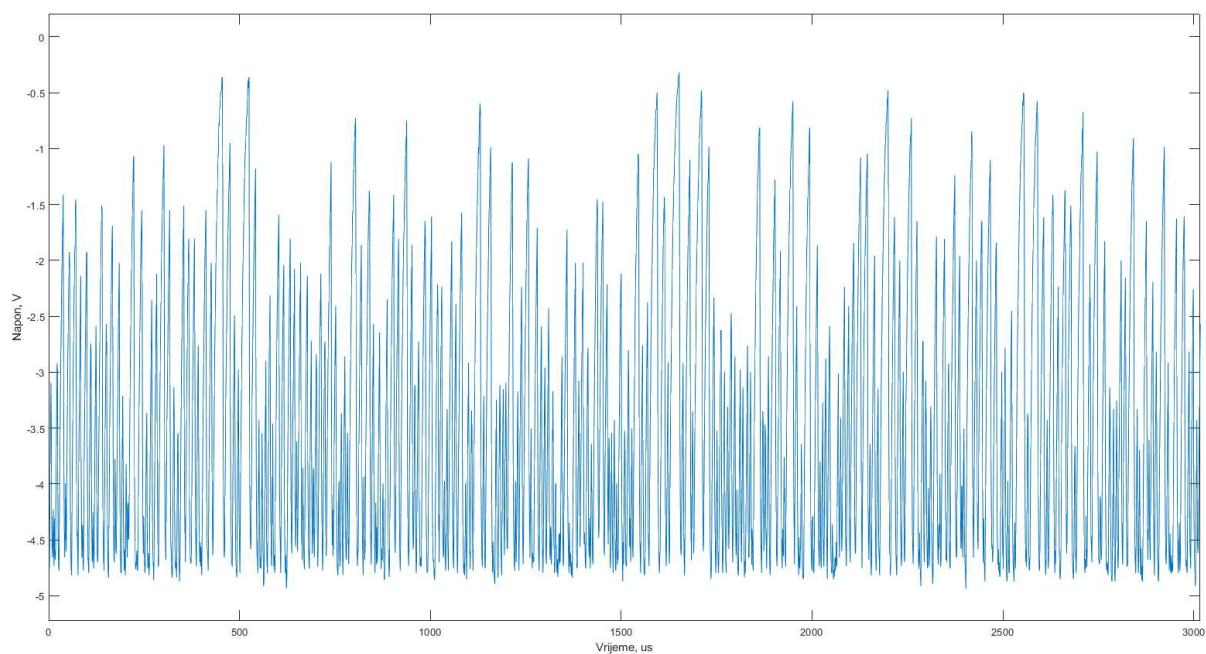
Slika 2.45 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 4. SPAD uz $V_{EX} = 2 \text{ V}$



Slika 2.46 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 4. SPAD uz $V_{EX} = 3 \text{ V}$

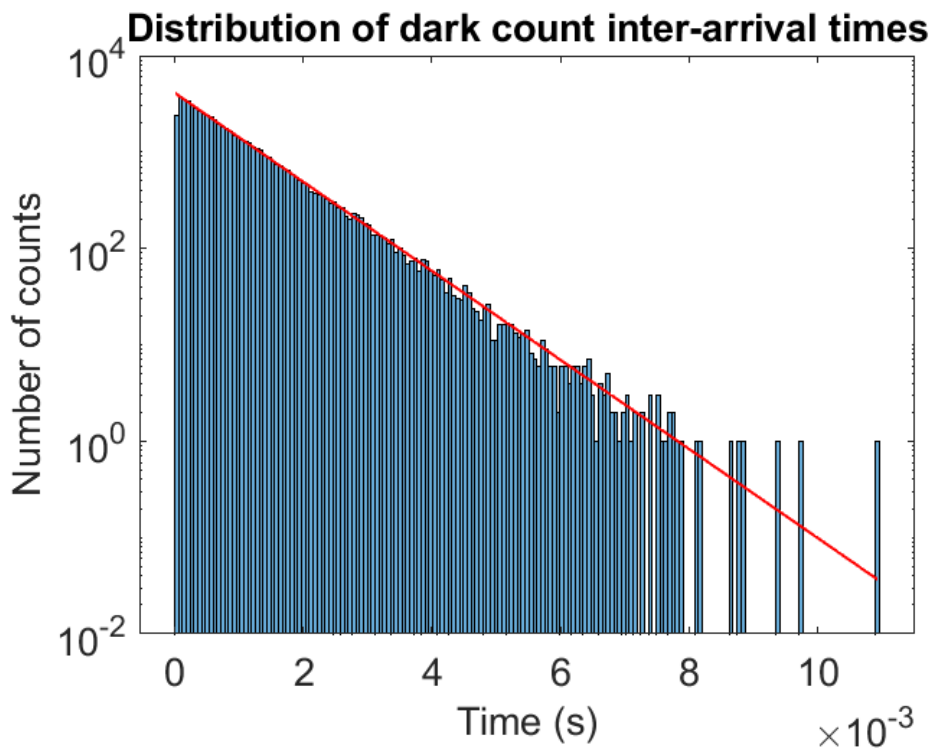


Slika 2.47 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 4. SPAD uz $V_{EX} = 4 \text{ V}$

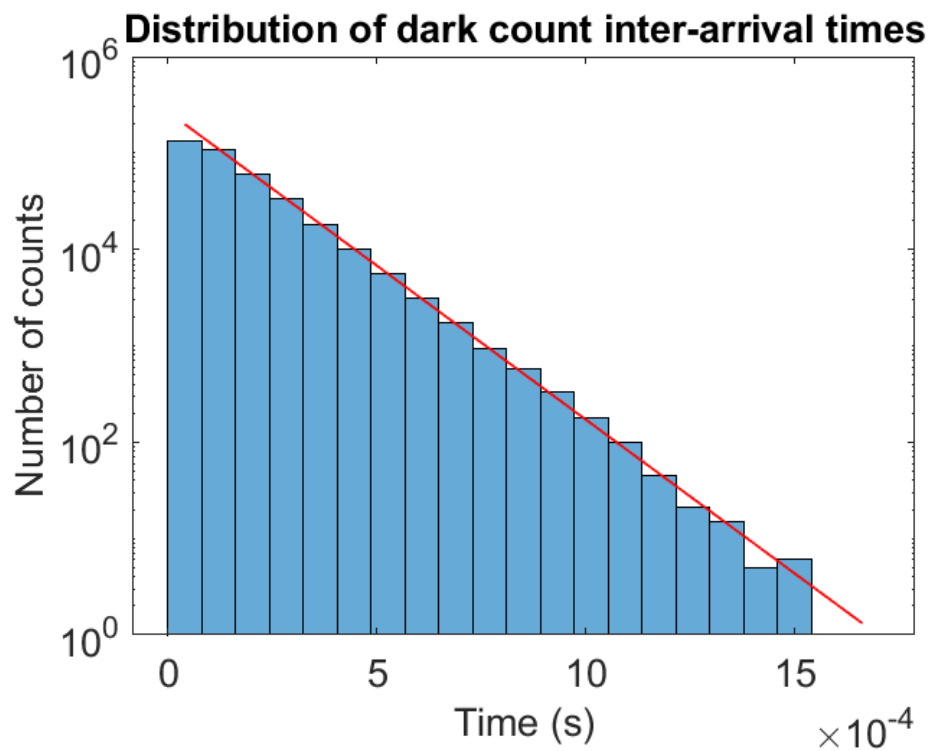


Slika 2.48 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 4. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

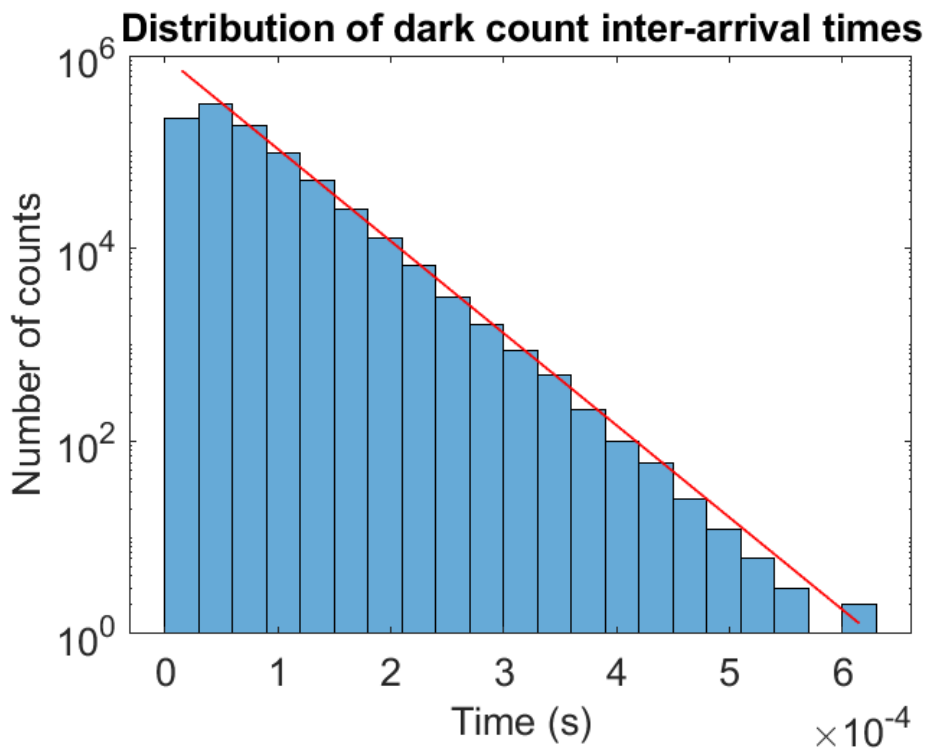
Zatim su prikazani histogrami za različite napone viška četvrtoga SPAD-a (Slika 2.49, Slika 2.50, Slika 2.51, Slika 2.52 i Slika 2.53). Iz histograma se vidi da u početku visine stupaca ne dostižu visinu očekivanu zbog aproksimiranog pravca što opravdava negativnu vrijednost naknadnih pulsiranja.



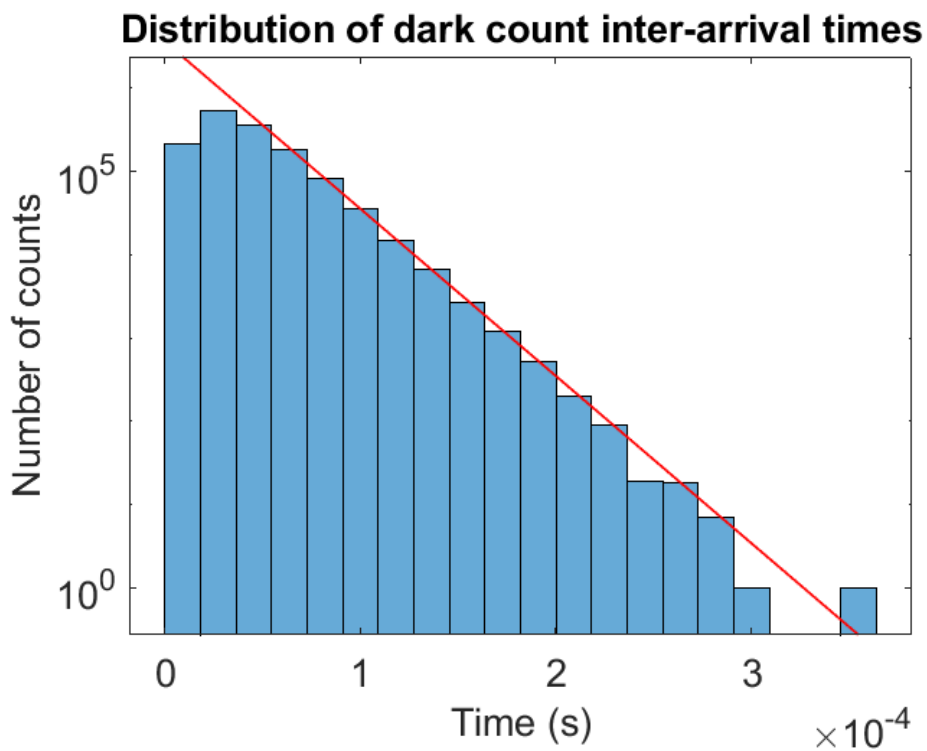
Slika 2.49 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 4. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



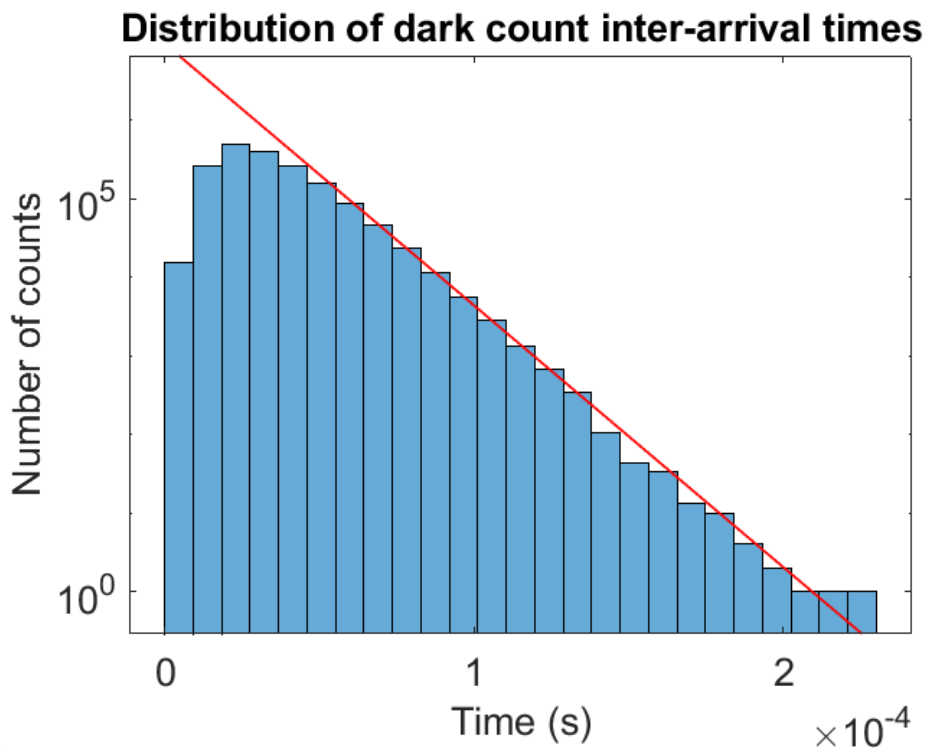
Slika 2.50 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 4. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.51 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 4. SPAD uz $V_{EX} = 3$ V



Slika 2.52 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 4. SPAD uz $V_{EX} = 4$ V



Slika 2.53 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 4. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

U nastavku slijede rezultati mjerenja za peti SPAD čiji probojni napon iznosi 47.7 V. Ovaj probojni napon veoma se razlikuje od onoga od prvog SPAD-a. Razlika ovoga SPAD-a u odnosu na četvrti SPAD jest što postoji i jako dopirano područje P3. Povećanje koncentracije pn-spoja smanjuje probojni napon. U ovom slučaju direktno se povećava koncentracija otoka koji čini p-n spoj pa je i očekivano da takva promjena ima veći utjecaj na promjenu probojnog napona od promjene koncentracija okoline pn-spoja. U ovom slučaju mogu se zanemariti greške prilikom mjerenja nastale zbog različitih temperatura na kojoj se mjerilo te mogućih defekata na čipu jer je razlika između probojnih napona za ta dva SPAD-a značajna. U tablici (Povećanje DCR-a je skoro u potpunosti linearno. Također, iz tablice se vidi da su sve vrijednosti DCR-a istog reda veličine, dok kod ostalih SPAD-ova to nije slučaj. Naknadno pulsiranje povećava se kako se povećava iznos napona viška, a razlike između njihovih iznosa mnogo su manje nago kod prethodnih SPAD-ova.

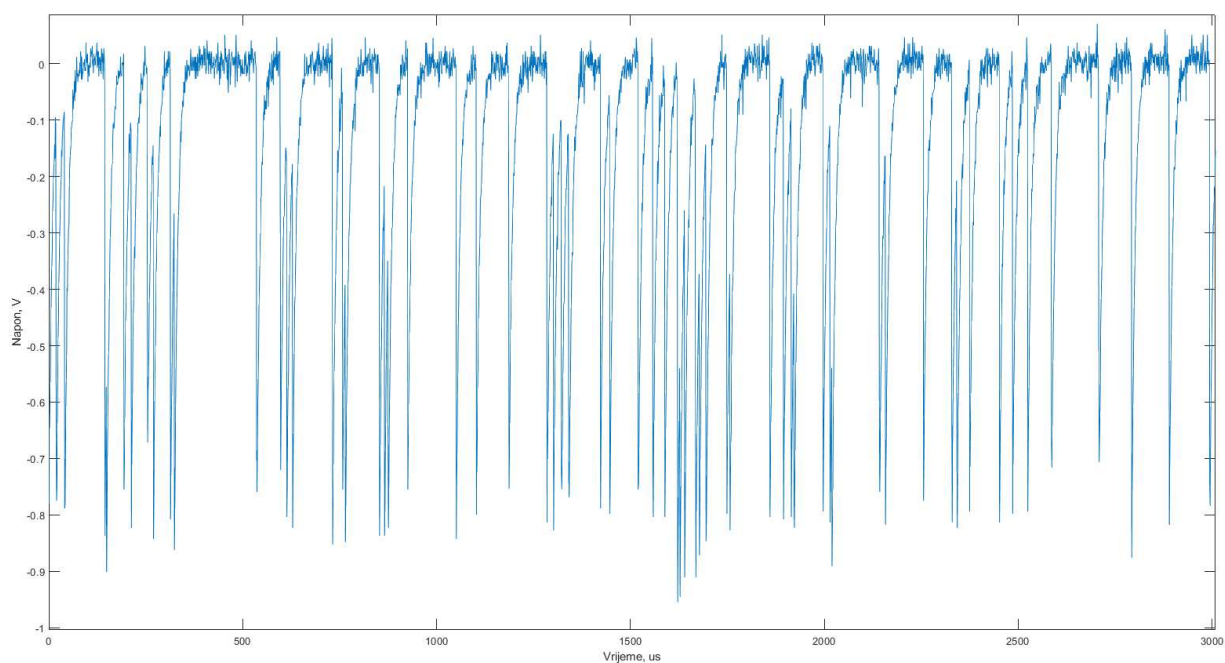
Tablica 8 Tablica 8 Tablica 6) su prikazane vrijednosti DCR-a te postotak pojave naknadnog pulsiranja za svih pet različitih napona viška. I u ovom se slučaju DCR povećava povećanjem napona viška kako je i očekivano, ali su razlike između DCR-a različitih napona viška manje

nego u ostalim slučajevima. Povećanje DCR-a je skoro u potpunosti linearno. Također, iz tablice se vidi da su sve vrijednosti DCR-a istog reda veličine, dok kod ostalih SPAD-ova to nije slučaj. Naknadno pulsiranje povećava se kako se povećava iznos napona viška, a razlike između njihovih iznosa mnogo su manje nago kod prethodnih SPAD-ova.

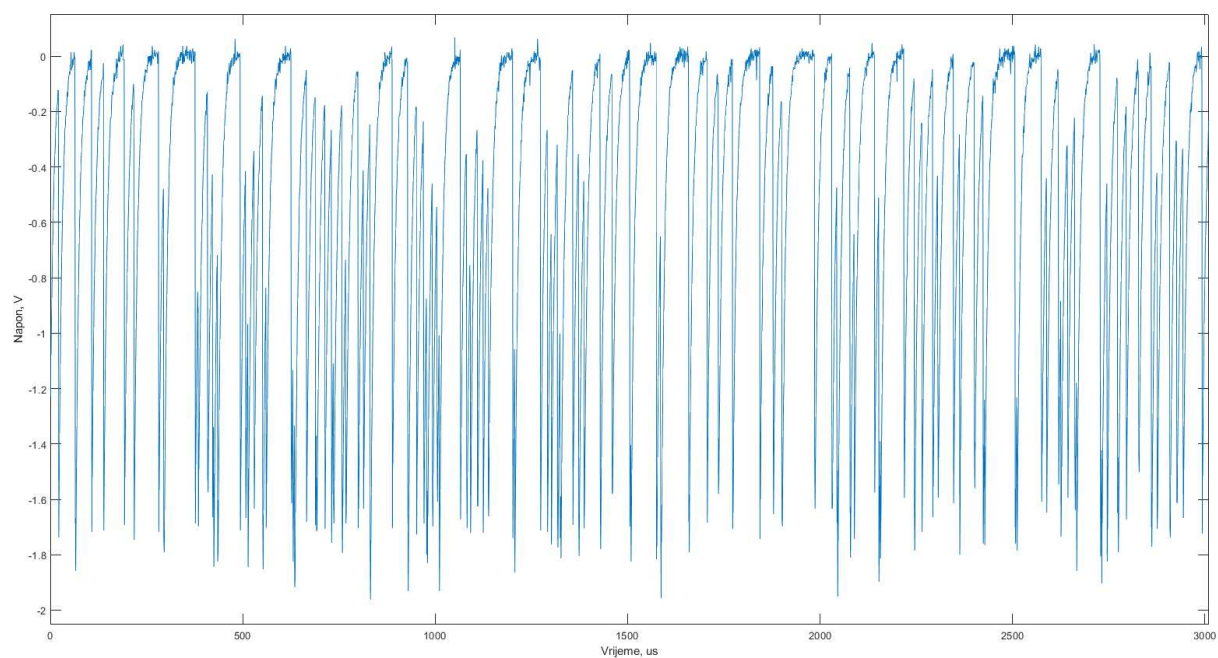
Tablica 8 DCR i Naknadno pulsiranje za 5. SPAD za različite priključene napone, odnosno napone viška

Priključeni napon V_B	Napon viška V_{EX}	DCR, Hz	Pojava naknadnog pulsiranja, %
$V_B = 48.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 1 \text{ V}$	7389.6	-16.45
$V_B = 49.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 2 \text{ V}$	12714	-18.92
$V_B = 50.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 3 \text{ V}$	17391	-19.89
$V_B = 51.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 4 \text{ V}$	21519	-21.28
$V_B = 52.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 5 \text{ V}$	25583	-26.81

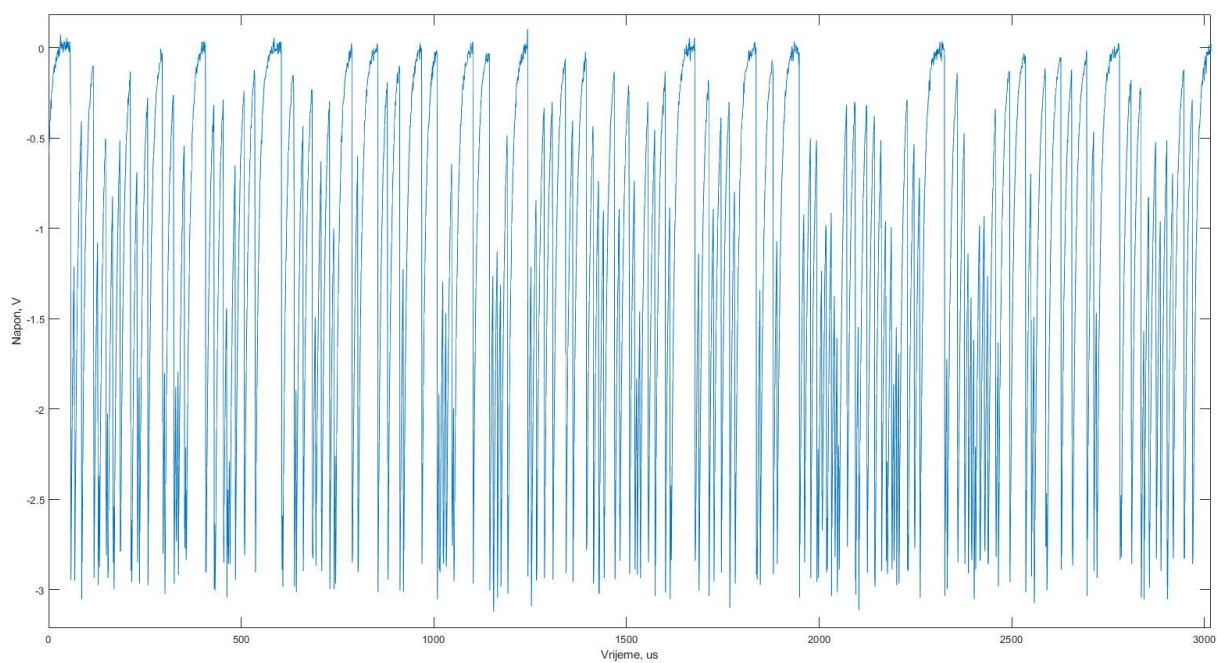
Slijede grafovi koji prikazuju pojave tamnih impulsa u istom vremenskom intervalu za različite napone viška petoga SPAD-a (Slika 2.54, Slika 2.55, Slika 2.56, Slika 2.57 i Slika 2.58). I u ovom se slučaju jasno na grafovima vidi povećavanje broja tamnih impulsa što je veći napon viška priključen na SPAD.



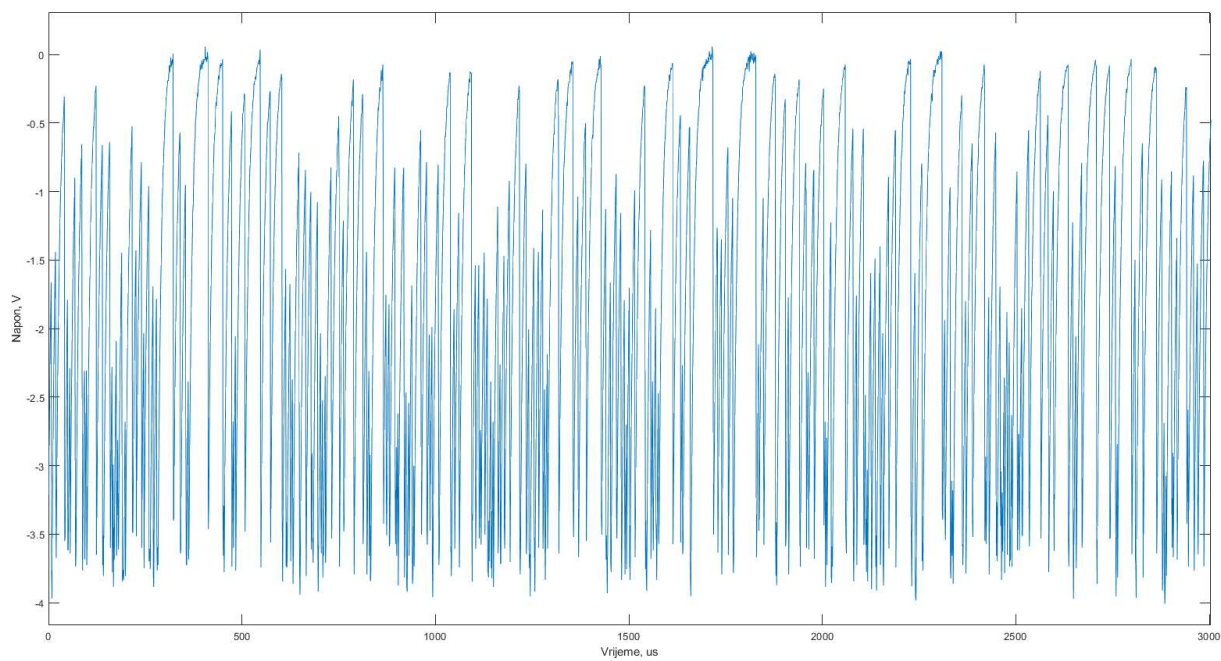
Slika 2.54 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 5. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



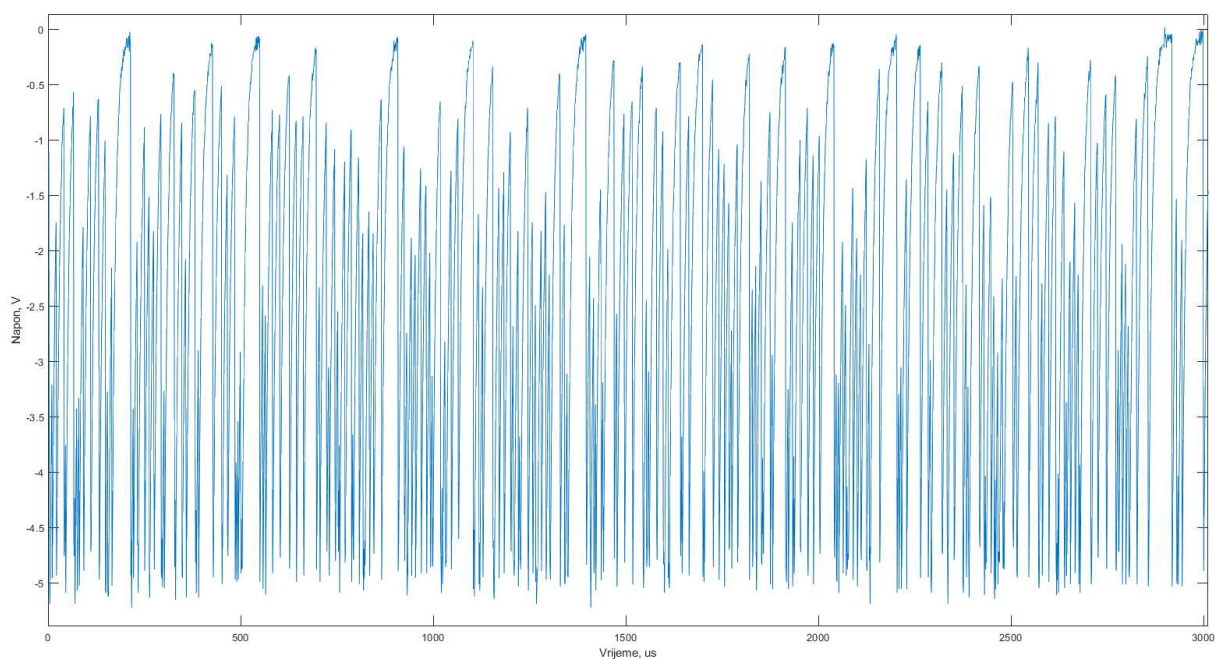
Slika 2.55 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 5. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.56 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 5. SPAD uz $V_{EX} = 3 \text{ V}$

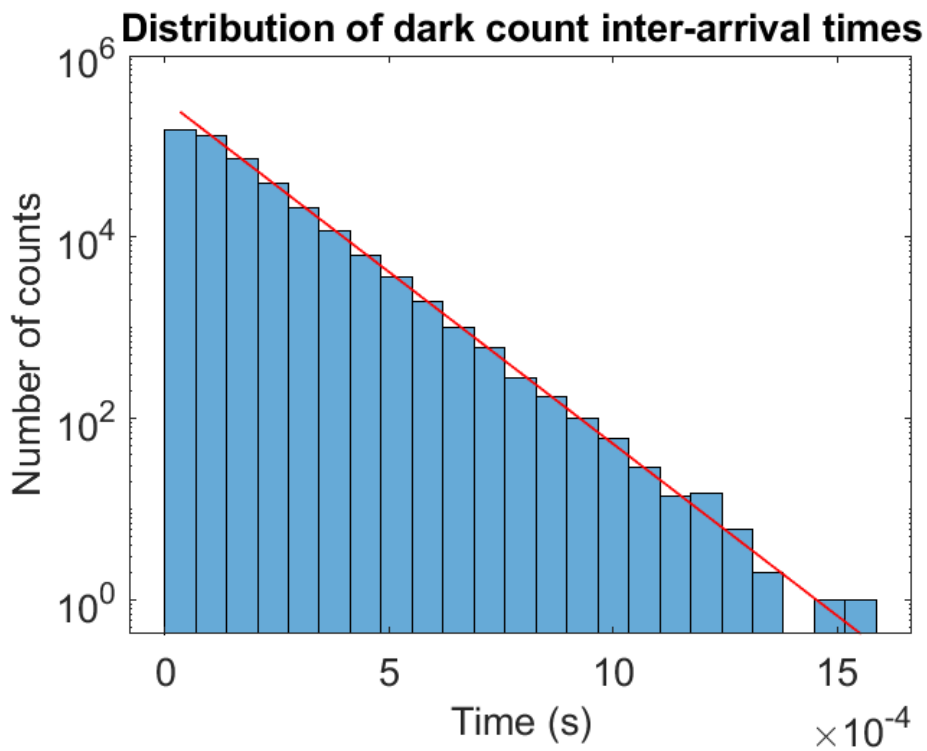


Slika 2.57 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 5. SPAD uz $V_{EX} = 4 \text{ V}$

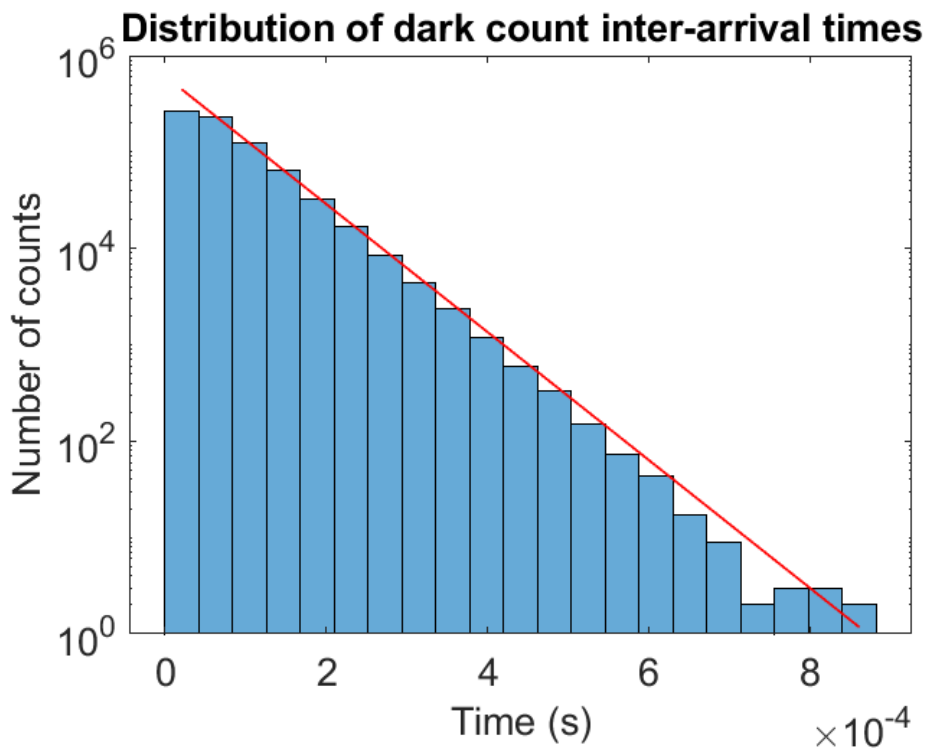


Slika 2.58 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 5. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

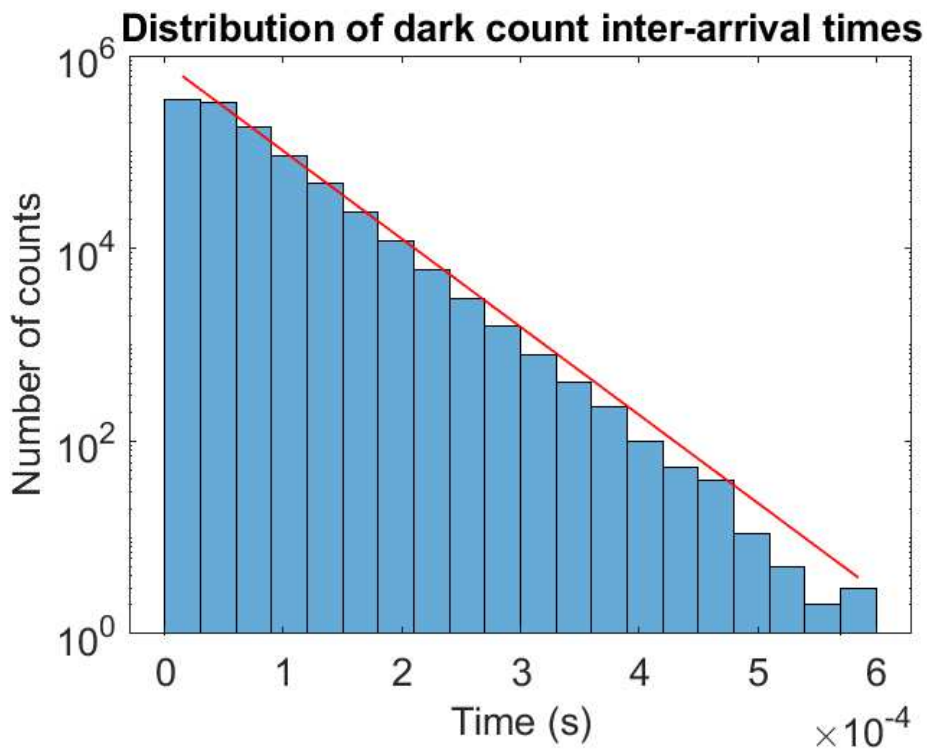
Zatim su prikazani histogrami za različite napone viška petoga SPAD-a (Slika 2.59, Slika 2.60, Slika 2.61, Slika 2.62 i Slika 2.63). I u ovom se slučaju vidi da početni stupci histograma na dostižu visinu aproksimiranu pravcem što potvrđuje prisutnost tamnih impulsa u mrtvom vremenu SPAD-a te dobivene negativne vrijednosti naknadnog pulsiranja.



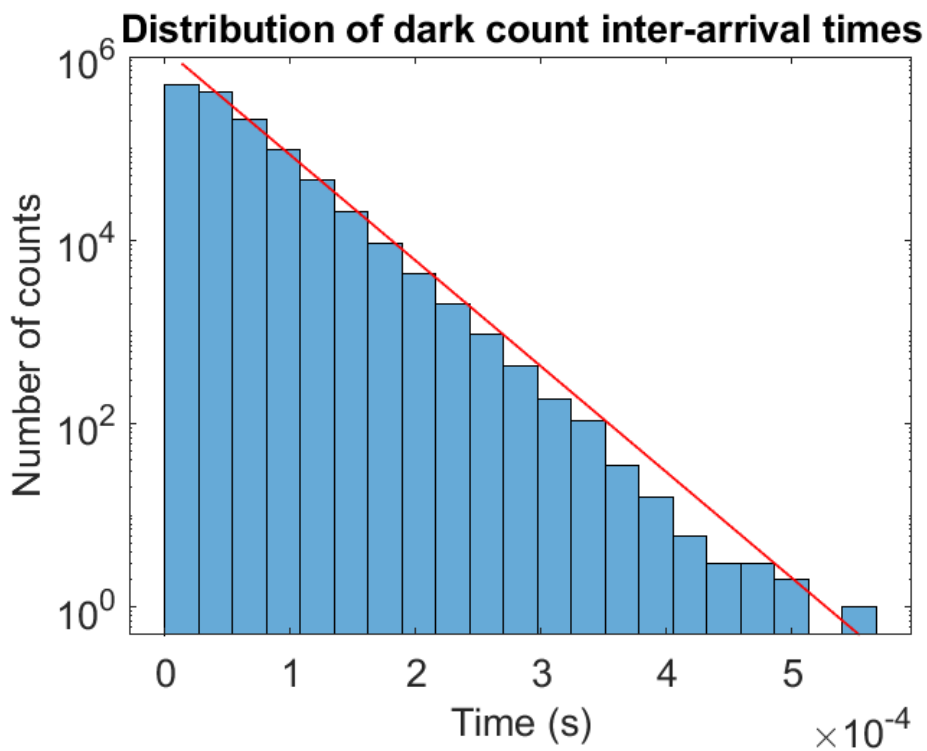
Slika 2.59 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 5. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



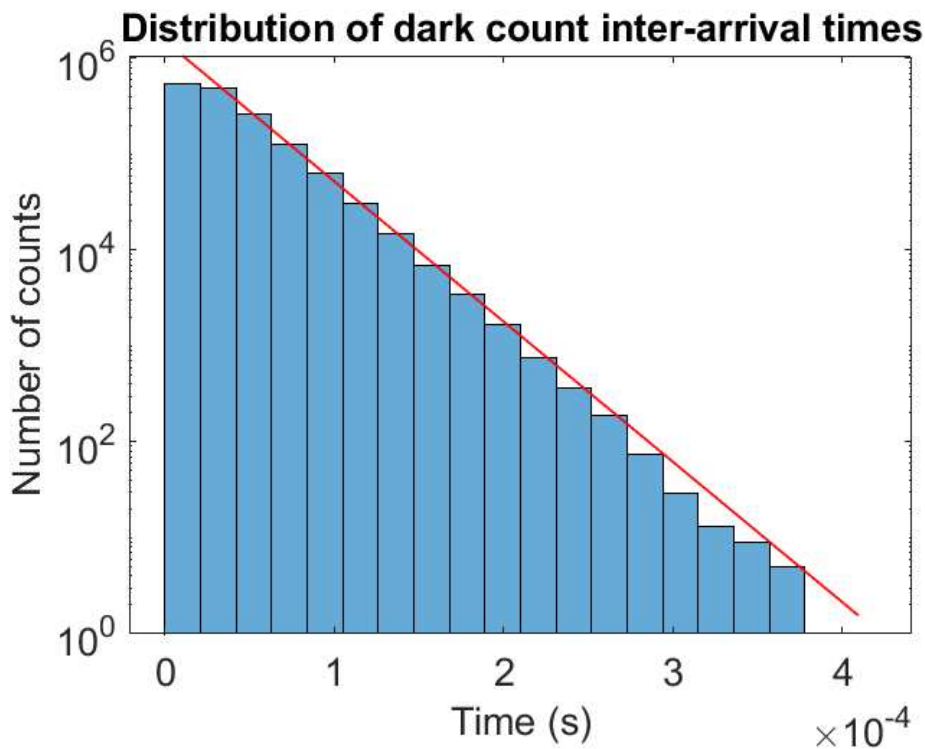
Slika 2.60 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 5. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.61 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 5. SPAD uz $V_{EX} = 3$ V



Slika 2.62 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 5. SPAD uz $V_{EX} = 4$ V



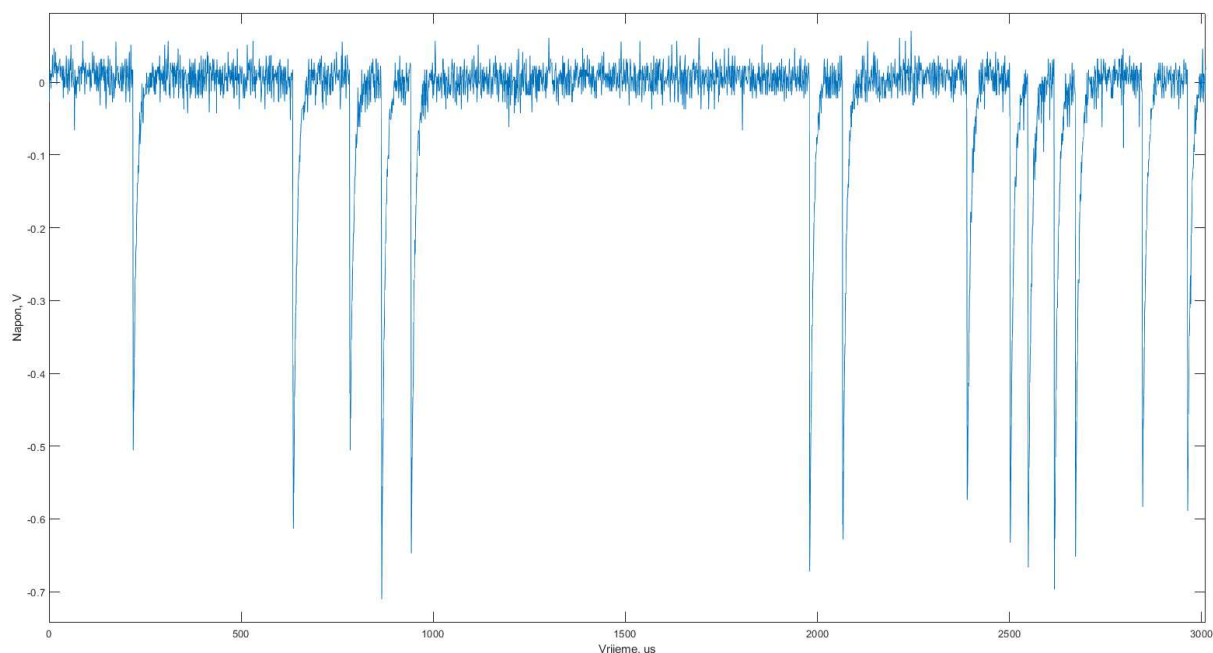
Slika 2.63 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 5. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

U nastavku slijede rezultati mjerenja za šesti SPAD čiji probojni napon iznosi 91.7 V. U odnosu na prvi SPAD, kod ovoga je područje N2 produljeno do STI-ja. Pri tome nije došlo do promjene površine aktivnog područja. Povećanje jako dopiranog n-područja rezultira smanjenjem širine osiromašenog područja. Kako je probojni napon ovisan o širini osiromašenog područja, smanjenjem širine osiromašenog područja smanjuje se i probojni napon. Promjena probojnog napona u odnosu na prvi SPAD nije značajna što znači da promjena veličine područja N2 nema značajan utjecaj na probojni napon. Također, na promjenu probojnog napon moglo je i utjecati što se nisu svi SPAD-ovi mjerili u isto vrijeme te mogući defekt na čipu. U tablici (Tablica 9 Tablica 6) su prikazane vrijednosti DCR-a te postotak pojave naknadnog pulsiranja za svih pet različitih napona viška. U tablici se vidi da DCR raste s povećanjem priključenog napona viška. Postotak naknadnog pulsiranja također raste kako se povećava napon viška te su njegove vrijednosti negativnog iznosa zbog pojave tamnih impulsa unutar mrtvog vremena SPAD-a.

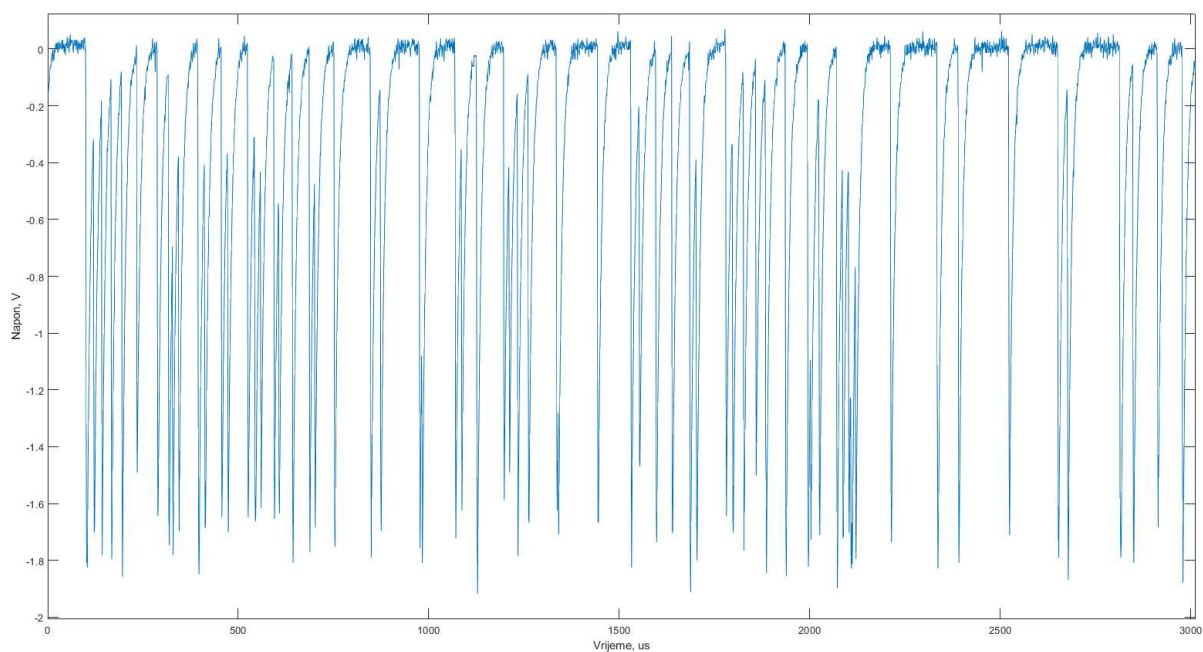
Tablica 9 DCR i Naknadno pulsiranje za 6. SPAD za različite priključene napone, odnosno napone viška

Priključeni napon V_B	Napon viška V_{EX}	DCR, Hz	Pojava naknadnog pulsiranja, %
$V_B = 92.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 1 \text{ V}$	993.9	-1.7
$V_B = 93.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 2 \text{ V}$	6375.7	-13.11
$V_B = 94.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 3 \text{ V}$	15092	-35.26
$V_B = 95.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 4 \text{ V}$	23435	-63.12
$V_B = 96.7 \text{ V}$	$V_{EX} = 5 \text{ V}$	28294	-86.21

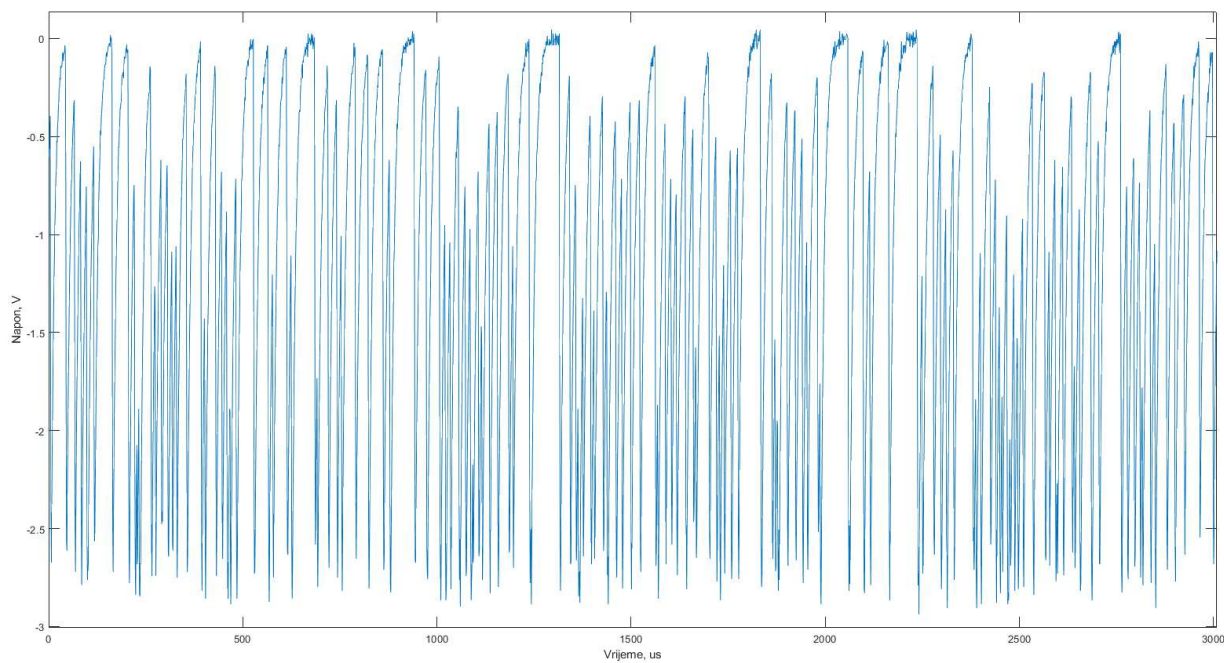
U nastavku su prikazani grafovi koji prikazuju pojave tamnih impulsa u istom vremenskom intervalu za različite napone viška prvoga SPAD-a (Slika 2.64, Slika 2.65, Slika 2.66, Slika 2.67 i Slika 2.68). U grafovima se vidi porast tamnih impulsa sa povećanjem napona viška te pojave tamnih impulsa unutar mrtvog vremena SPAD-a.



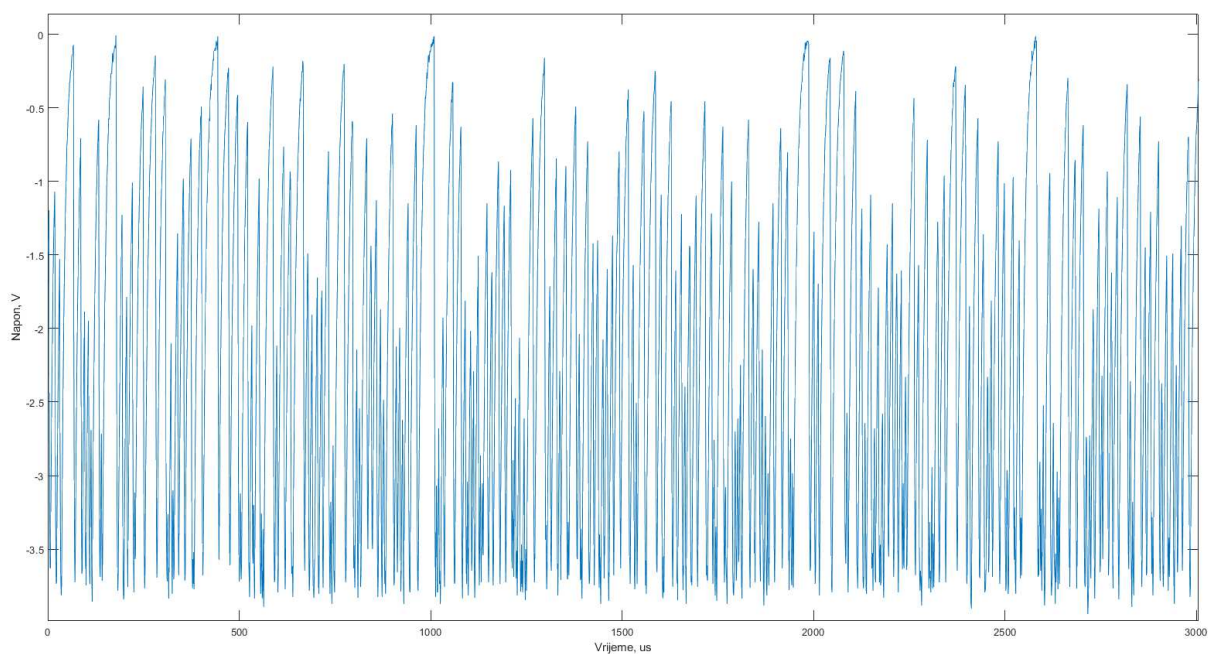
Slika 2.64 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 6. SPAD uz $V_{EX} = 1 \text{ V}$



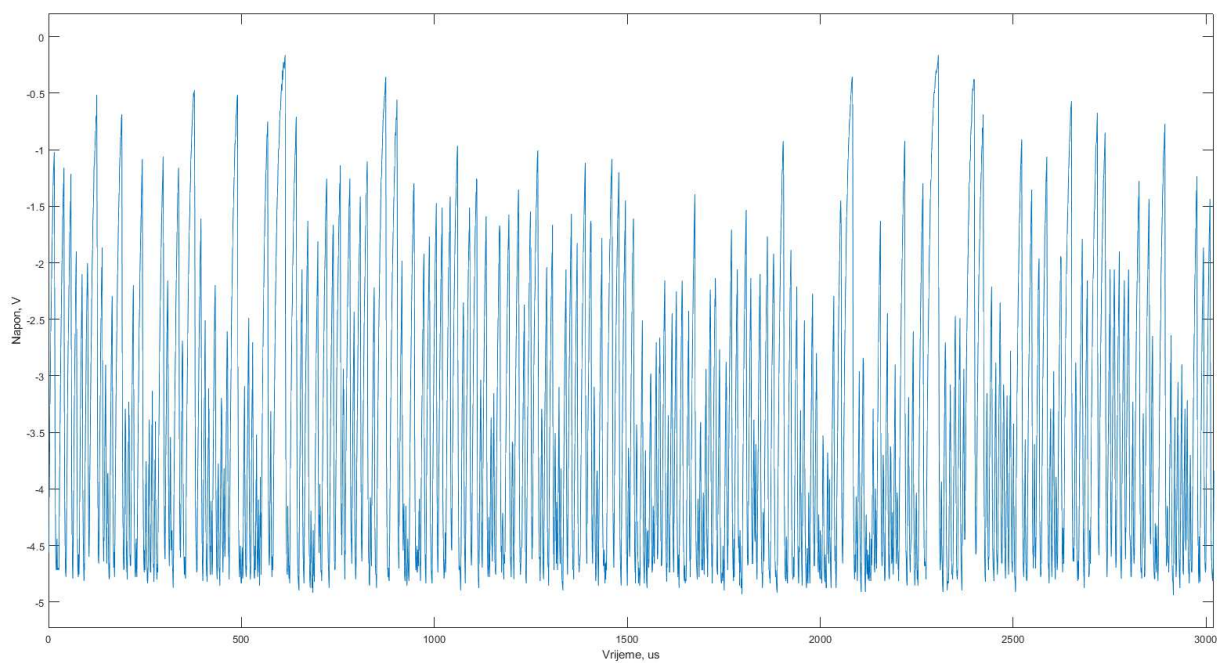
Slika 2.65 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 6. SPAD uz $V_{EX} = 2 \text{ V}$



Slika 2.66 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 6. SPAD uz $V_{EX} = 3 \text{ V}$

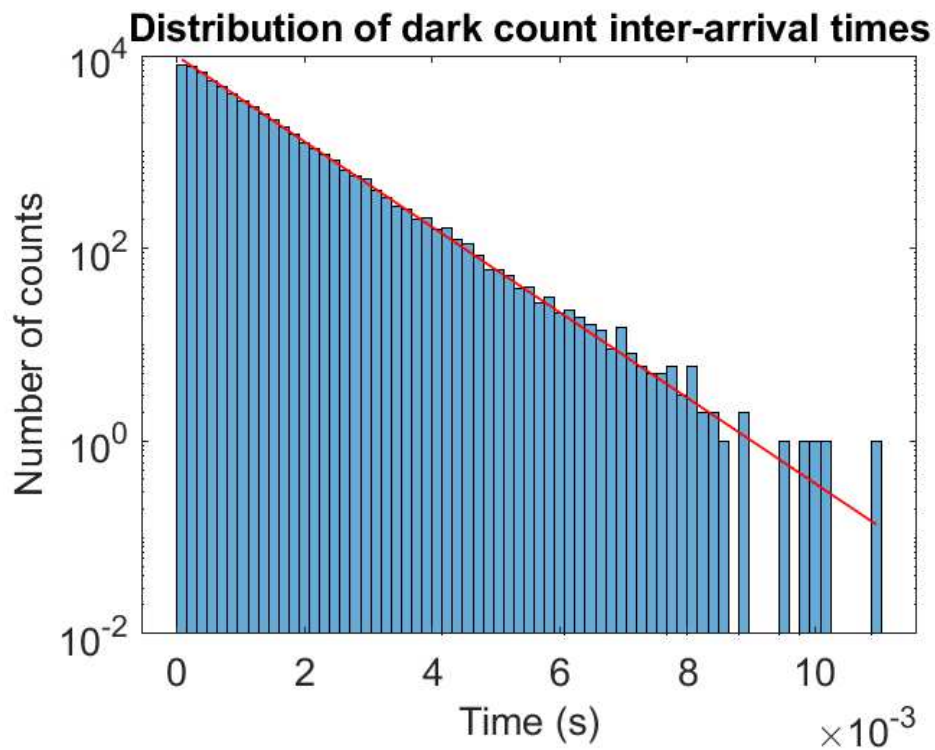


Slika 2.67 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 6. SPAD uz $V_{EX} = 4 \text{ V}$

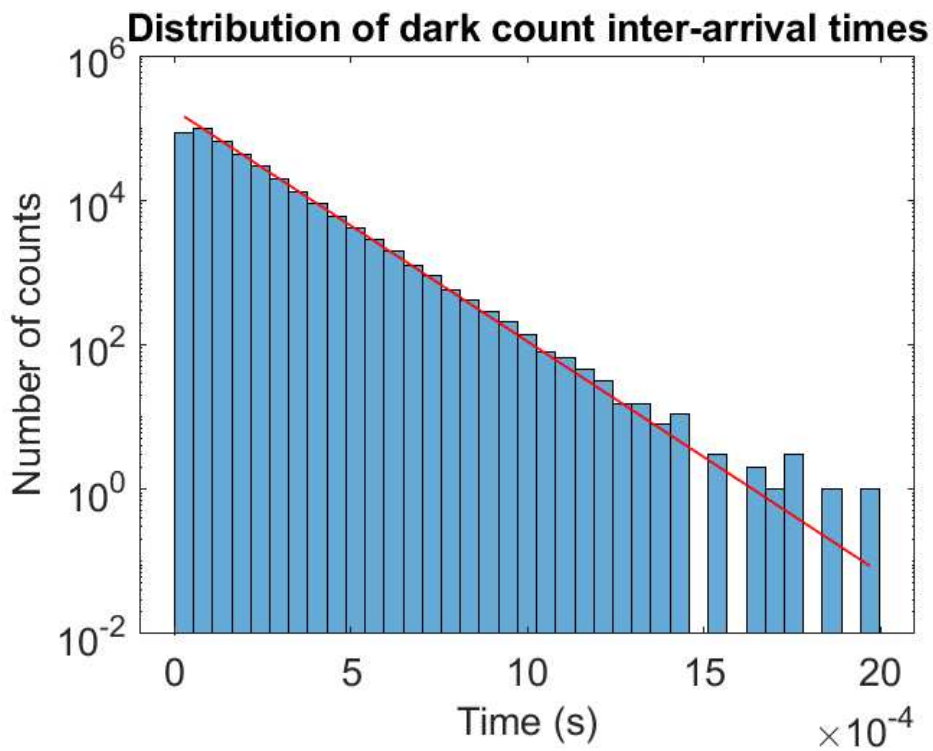


Slika 2.68 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 6. SPAD uz $V_{EX} = 5 \text{ V}$

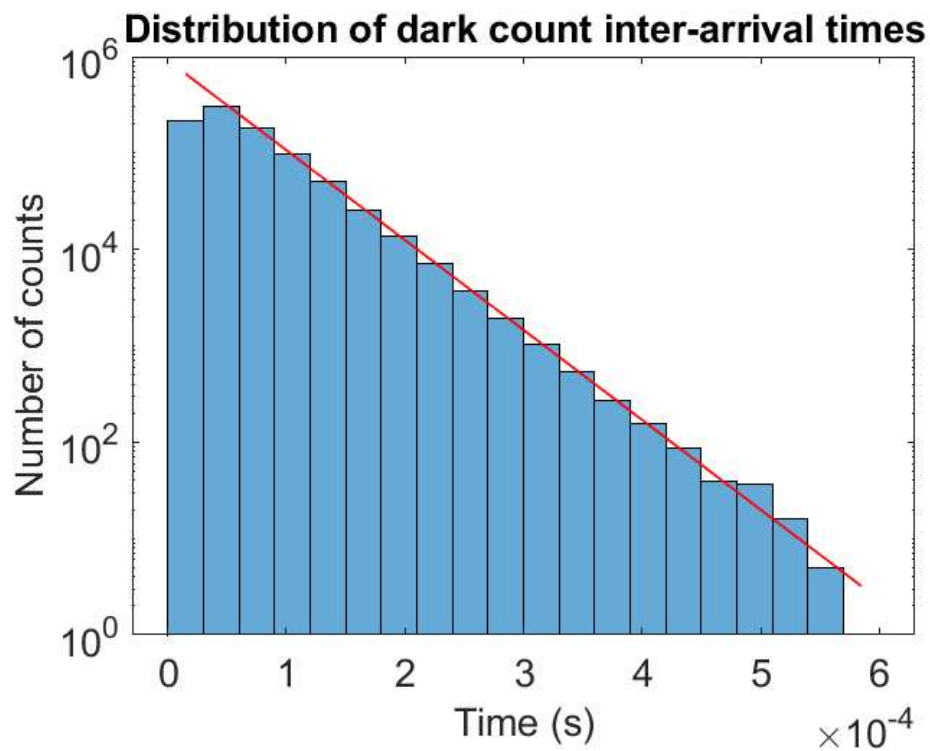
U nastavku su prikazani histogrami za različite napone viška prvoga SPAD-a (Slika 2.69, Slika 2.70, Slika 2.71, Slika 2.72 i Slika 2.73). I u ovom se skupu histograma vidi pojava tamnih impulsa u mrtvom vremenu zbog čega visina prvih stupaca histograma ne dostiže visinu aproksimiranog pravca.



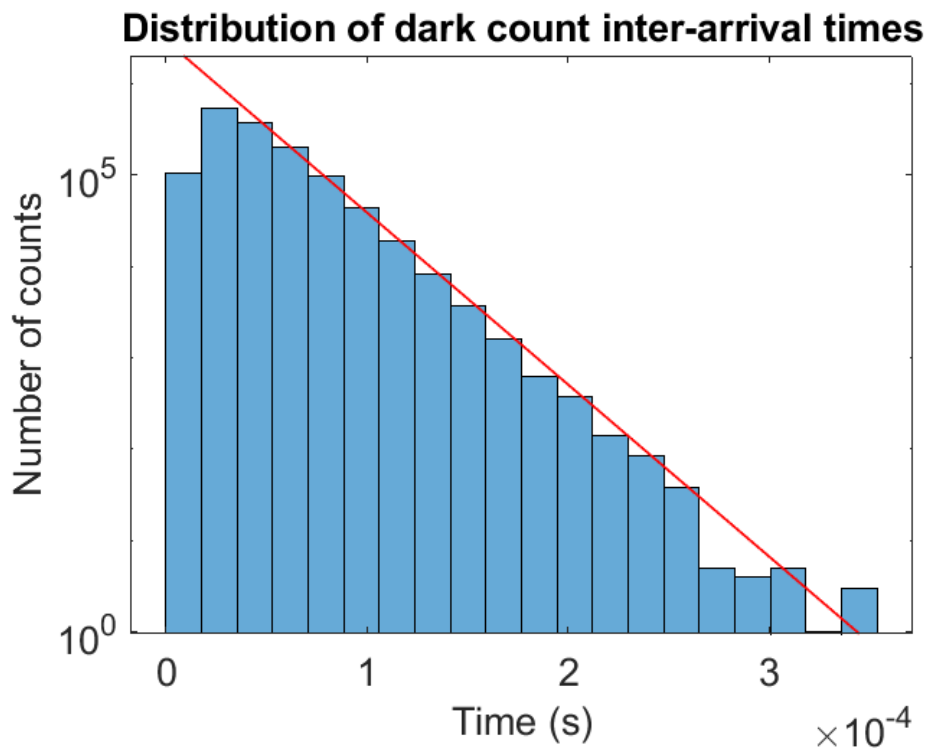
Slika 2.69 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 6. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



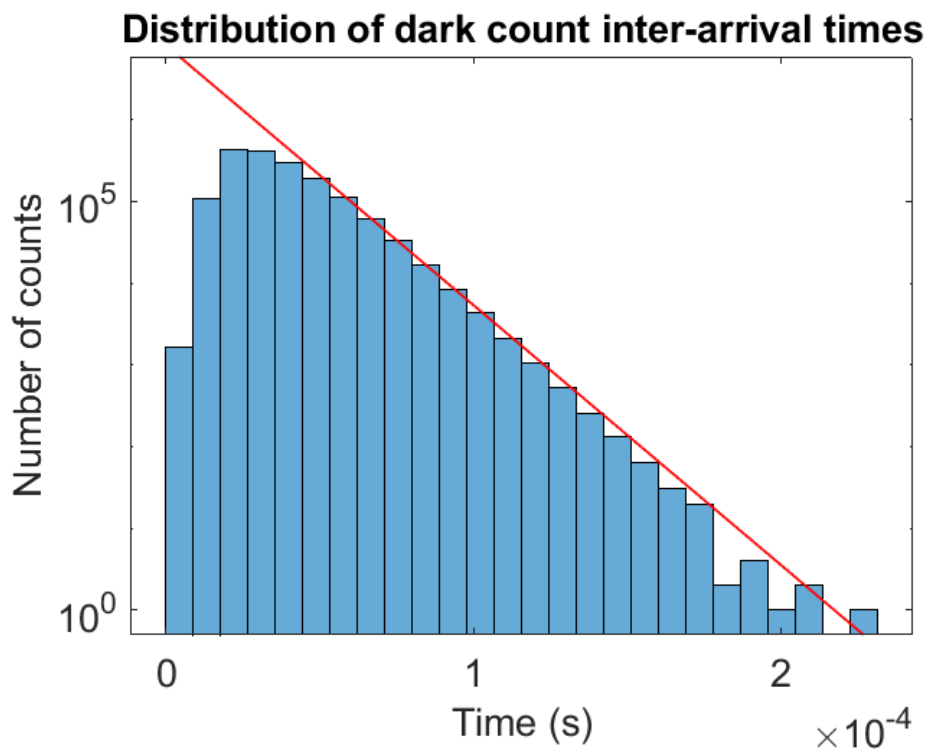
Slika 2.70 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 6. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.71 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 6. SPAD uz $V_{EX} = 3$ V



Slika 2.72 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 6. SPAD uz $V_{EX} = 4 \text{ V}$



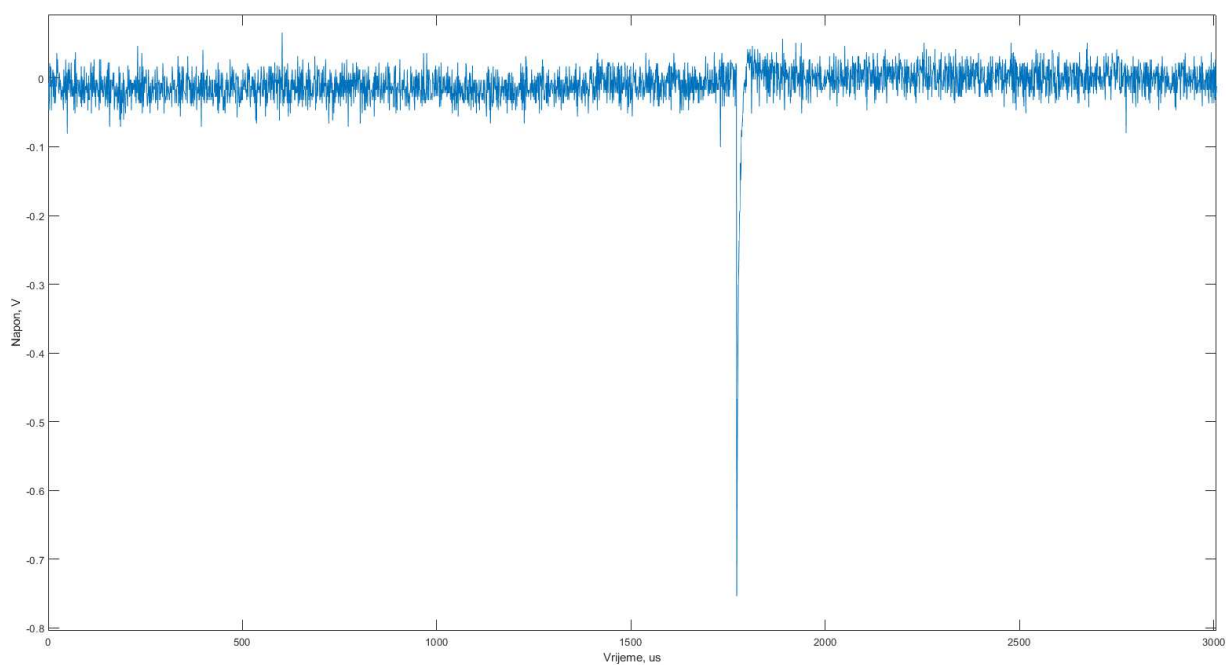
Slika 2.73 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 6. SPAD uz $V_{EX} = 5 \text{ V}$

U nastavku slijede rezultati mjerenja za sedmi SPAD čiji probojni napon iznosi 107.3 V. Ovaj se SPAD razlikuje se od prvog po tome što mu je polumjer katode dvostruko manji od onoga kod prvog SPAD-a. Smanjenjem površine katode smanjuje se aktivno područje SPAD-a. Smanjenje aktivnog područja znači smanjenje pn-spoja, odnosno jako dopiranih p- i n- otoka. Zbog manjih površina otoka, utjecaj difuzije na smanjenje koncentracije otoka jače dolazi do izražaja. Smanjenjem koncentracije povećava se širina osiromašenog područja zbog čega se povećava i probojni napon od prvoga po promjeru katode. Za ovaj se SPAD napon proboja značajno razlikuje od onoga prvoga SPAD-a. U tablici (Tablica 10 Tablica 6) su prikazane vrijednosti DCR-a te postotak pojave naknadnog pulsiranja za svih pet različitih napona viška. DCR se povećava kako se povećava napon viška. Iznosi naknadnog pulsiranja ne rastu sa povećanjem napona viška. Za priključeni napon viška iznosa 2 V, naknadno pulsiranje je pozitivnog iznosa što znači da je uistinu došlo do naknadnog pulsiranja.

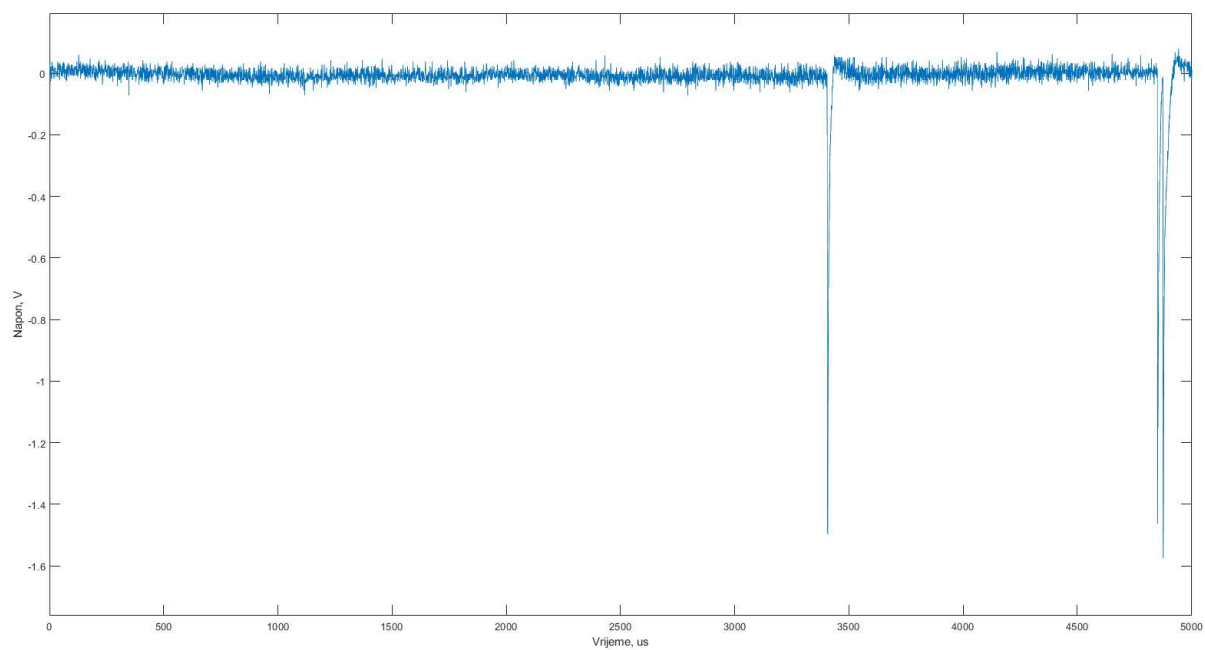
Tablica 10 DCR i naknadno pulsiranje za 7. SPAD za različite priključene napone, odnosno napone viška

Priključeni napon V_B	Napon viška V_{EX}	DCR, Hz	Pojava naknadnog pulsiranja, %
$V_B = 108.3$ V	$V_{EX} = 1$ V	109.47	-2.54
$V_B = 109.3$ V	$V_{EX} = 2$ V	264.48	0.2
$V_B = 110.3$ V	$V_{EX} = 3$ V	628.50	-0.45
$V_B = 111.3$ V	$V_{EX} = 4$ V	1626.5	-2.76
$V_B = 112.3$ V	$V_{EX} = 5$ V	24859	-4.18

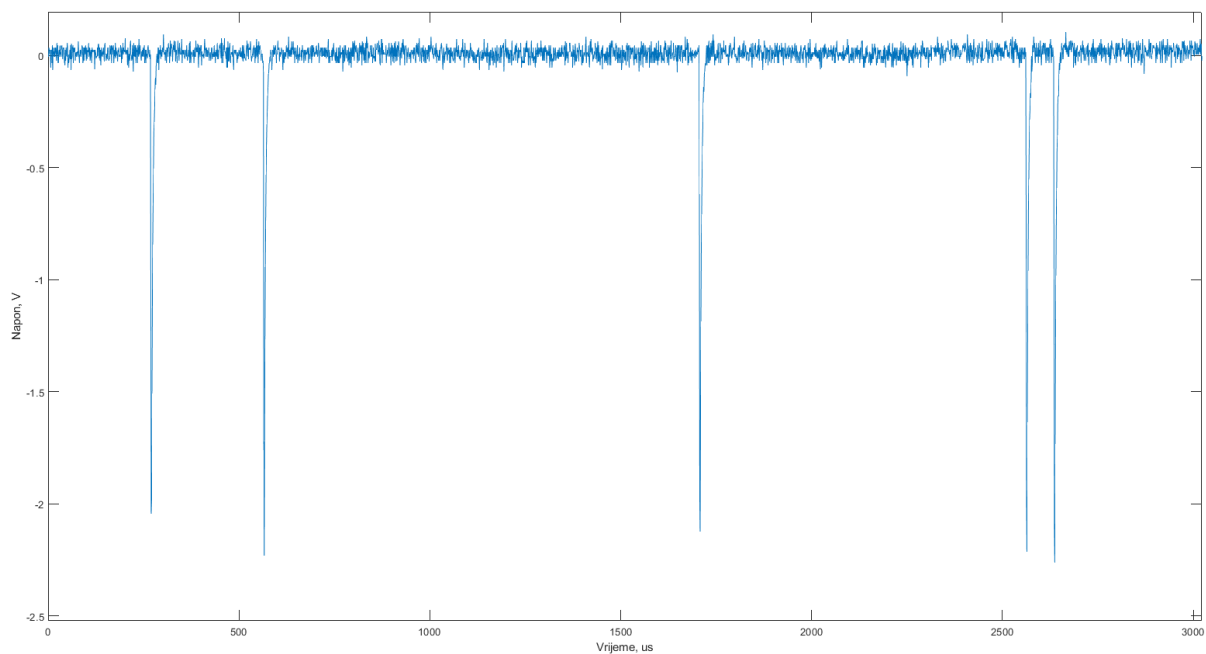
Slijede grafovi koji prikazuju pojave tamnih impulsa u istom vremenskom intervalu za različite napone viška prvoga SPAD-a (Slika 2.74, Slika 2.75, Slika 2.76, Slika 2.77 i Slika 2.78). U grafovima se vidi da za razliku od ostalih SPAD-ova, kod ovoga skoro pa da nema tamnih impulsa za vrijeme potiskivanja na početni napon.



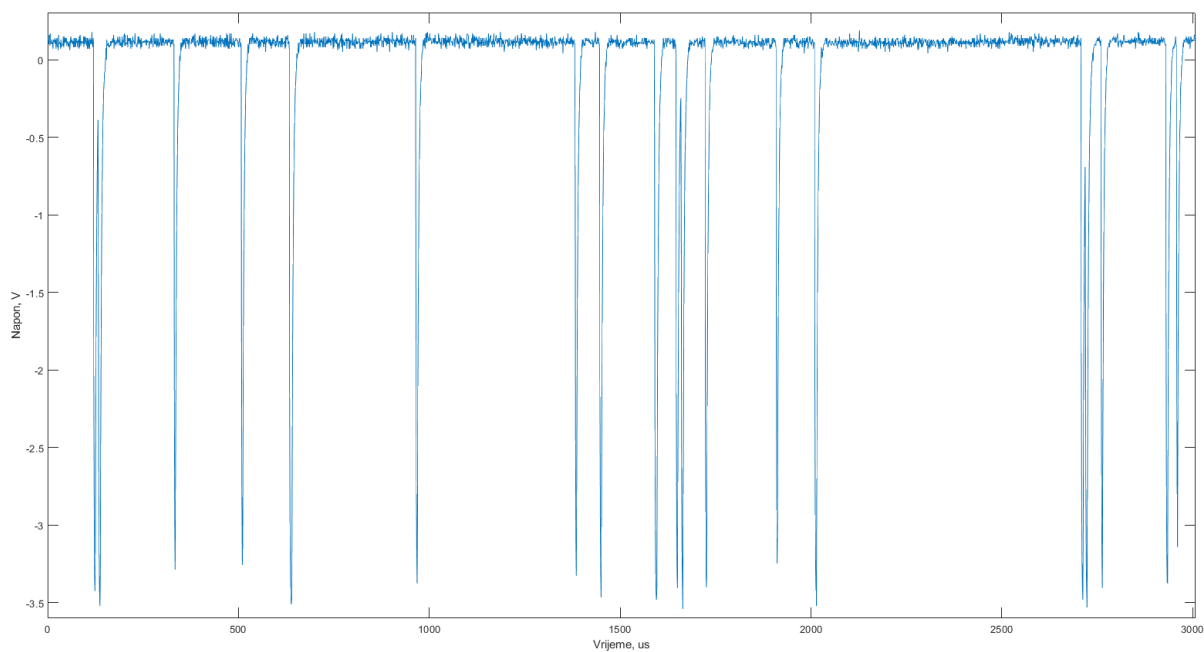
Slika 2.74 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 7. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



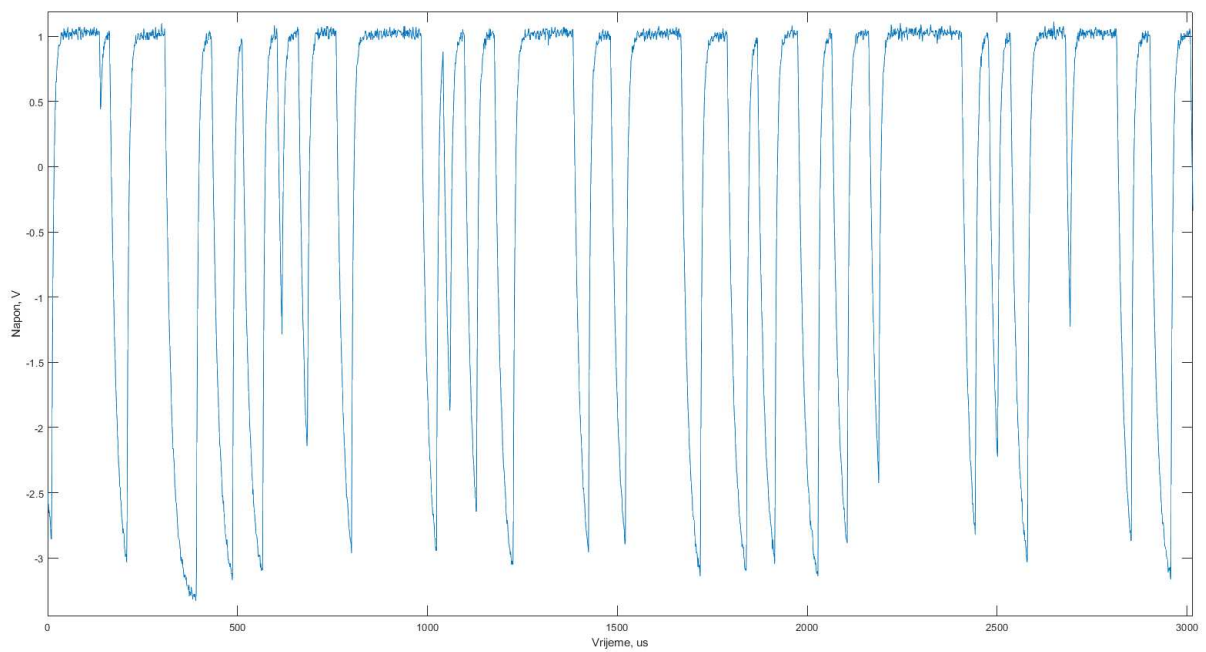
Slika 2.75 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 7. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.76 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 7. SPAD uz $V_{EX} = 3\text{ V}$

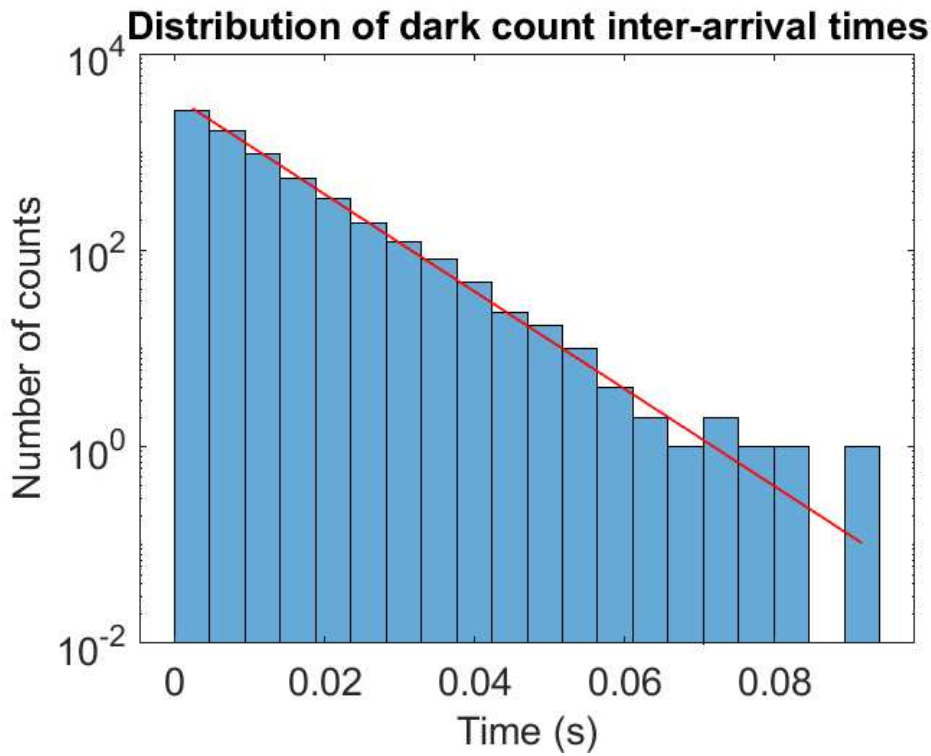


Slika 2.77 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 7. SPAD uz $V_{EX} = 4\text{ V}$

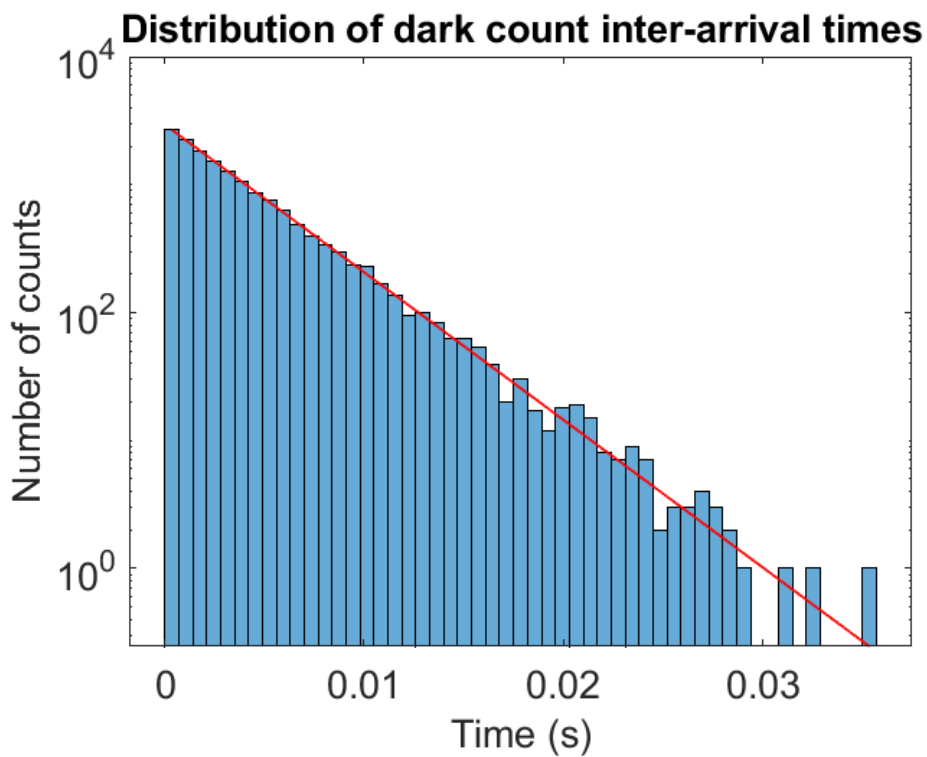


Slika 2.78 Prikaz tamnih impulsa u vremenskom intervalu za 7. SPAD uz $V_{EX} = 5 V$

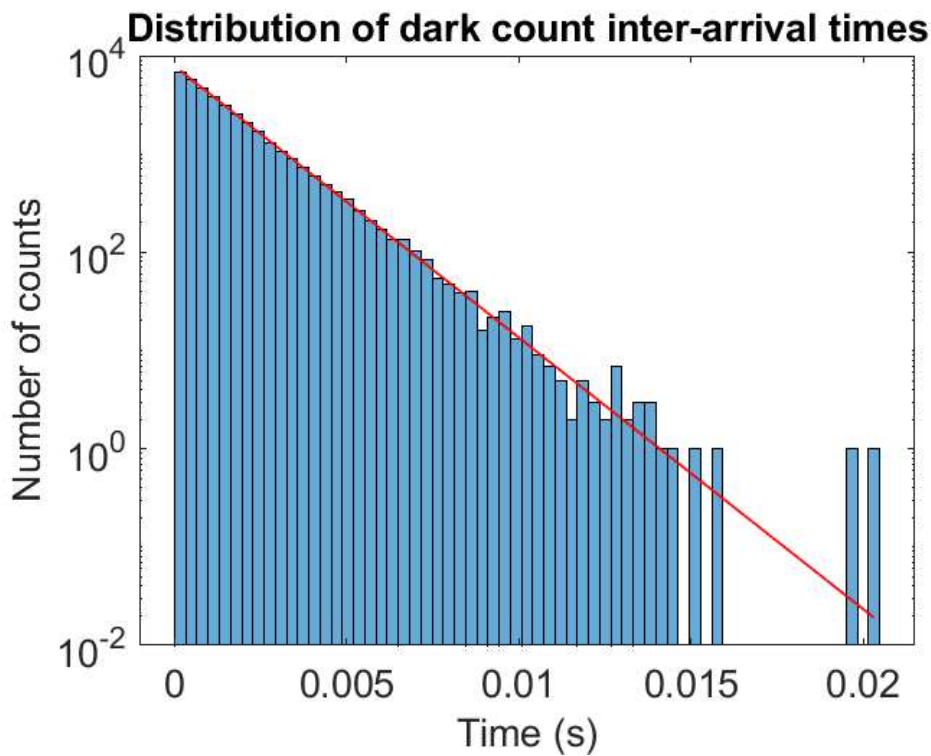
Zatim su prikazani histogrami za različite napone viška prvoga SPAD-a (Slika 2.79, Slika 2.80, Slika 2.81, Slika 2.82 i Slika 2.83).



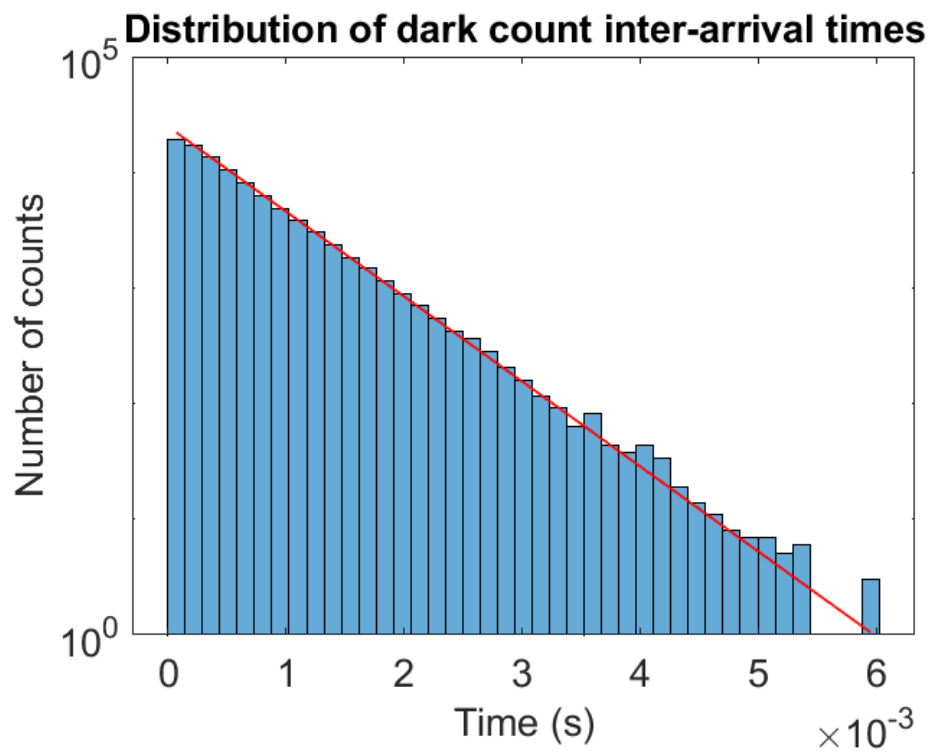
Slika 2.79 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 7. SPAD uz $V_{EX} = 1$ V



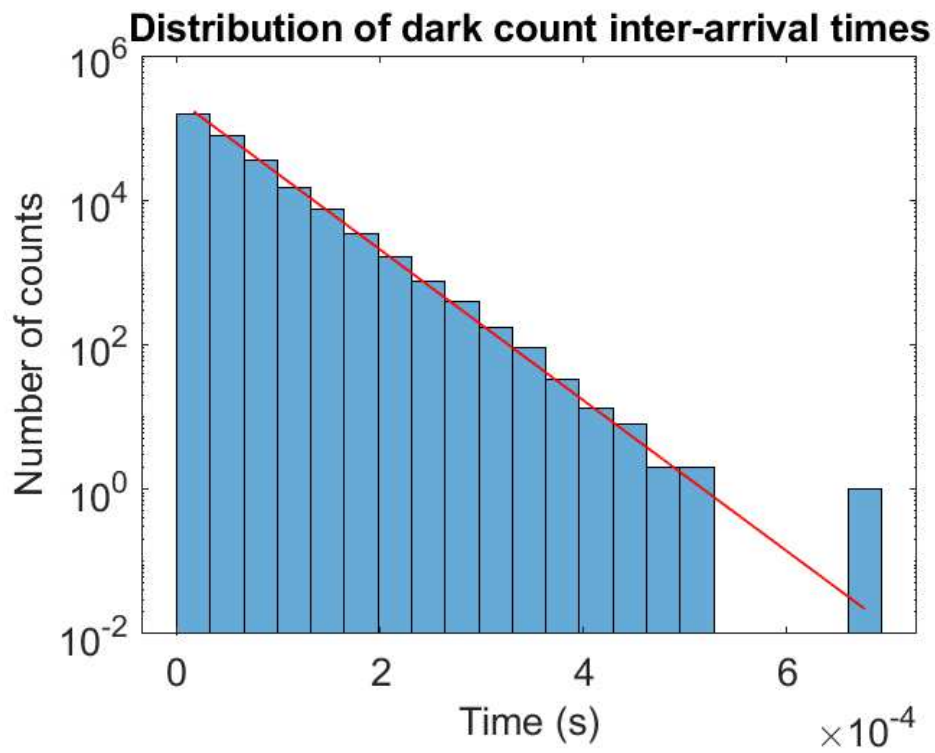
Slika 2.80 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 7. SPAD uz $V_{EX} = 2$ V



Slika 2.81 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 7. SPAD uz $V_{EX} = 3$ V



Slika 2.82 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 7. SPAD uz $V_{EX} = 4$ V

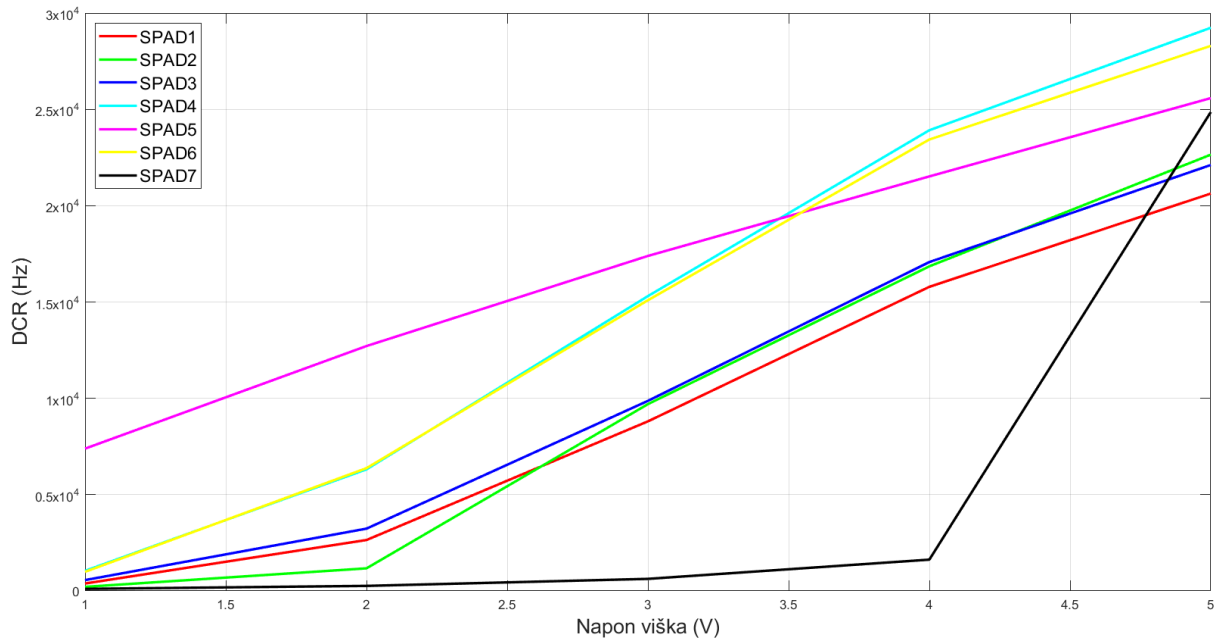


Slika 2.83 Histogram vremena između pojave dva uzastopna impulsa koja izazivaju lavinsku multiplikaciju za 7. SPAD uz $V_{EX} = 5$ V

2.2.1. Analiza rezultata

Slika u nastavku (Slika 2.84) prikazuje graf sa iznosima DCR-a u ovisnosti o naponima viška svih mjerenih SPAD-ova. Iz toga se grafa vidi da su frekvencije tamnih impulsa drugoga i trećega SPAD-a najbližnje vrijednostima DCR-a prvoga SPAD-a. Iz te se činjenice može zaključiti da postojanje dodatnog slabo dopiranog područja u okolici pn-spoja te postojanje *poly spacer*-a nema značajan utjecaj na frekvenciju tamnih impulsa. Veći utjecaj na frekvenciju tamnih impulsa, u odnosu na prvi SPAD, imaju četvrti, peti i šesti SPAD, pri čemu su razlike između DCR-a četvrtog i šestog SPAD-a veoma male. Može se zaključiti da promjena veličine aktivnog područja, postojanje dodatnih jako dopiranih područja te promjena površina jako dopiranih otoka značajno utječe na DCR. U ovom su se radu analizirali slučajevi kada površina aktivnog područja povećala (SPAD 4), doping p-otoka pn-spoja povećao (SPAD 5) te povećala površina jako dopiranog -otoka pn-spoja (SPAD 6) što je uzrokovalo povećanje frekvencije tamnih impulsa u odnosu na prvi SPAD. Pri manjim naponima viška ($V_{EX}=1V$ - $V_{EX}=3V$), utjecaj promjene površina otoka koji čine pn-spoj doprinijele su manjem povećanju DCR-a od povećanja dopinga n-otoka koji čini pn-spoj, dok je za veće napone viška situacija obruta. Značajan utjecaj na frekvenciju tamnih impulsa imala je i promjena površine katode. U ovom je slučaju promjena bila smanjenje površine katode, odnosno promjer katode sedmog SPAD-a bio je dvostruko manji nego kod prvog SPAD-a, što je uzrokovalo značajno smanjenje DCR-a osim za napon viška $V_{EX}=5$ V. Smanjene površine katode imalo je najbolji utjecaj na frekvenciju tamnih impulsa, to jest uzrokovalo je značajno smanjenje DCR-a. To je bila jedina promjena strukture pri kojoj se DCR značajno smanjio u odnosu na prvi SPAD za skoro sve napone viška. Osim kod sedmog SPAD-a, može se uočiti da je DCR drugog SPAD-a također bio manji od DCR-a prvoga SPAD-a no samo za napone viška $V_{EX}=1$ V te $V_{EX}=2$ V. To smanjenje DCR-a uzrokovano n-otokom u okolici pn-spoja manje je smanjilo DCR i u kraćem intervalu od sedmoga SPAD-a. Može se zaključiti da je najpogodnija struktura za SPAD-ove struktura sedmoga SPAD, odnosno SPAD sa smanjenom površinom katode.

Na DCR utječe i napon viška tako da povećanjem viška raste DCR. To se pokazalo i u rezultatima mjerenja svakoga SPAD-a. Očekivalo se i da će porast DCR-a biti linearan kako se povećava napon viška no to se nije dogodilo ni kod jednog SPAD-a. U grafu (Slika 2.84) vidi se da je većine karakteristika linearna u dijelu između $V_{EX}=2$ V i $V_{EX}=4$ V.



Slika 2.84 Prikaz DCR-a svih SPAD-ova u ovisnosti o naponima viška

Zbog toga što je i naknadno pulsiranje ovisno o naponu viška, u rezultatima mjerenja očekivalo se da naknadno pulsiranje raste s naponom viška. To se dogodilo za sve SPAD-ove, osim kod drugog i sedmog. Na naknadno pulsiranje utječe i mrtvo vrijeme, no ono je kod svih SPAD-ova bilo jednako tako da nije imalo utjecaj na rezultate. Pokazalo se da naknadno pulsiranje ima najmanje iznose kod petog i sedmog SPAD-a. Kod petog je SPAD-a razlika između najvećeg i najmanjeg naknadnog pulsiranja svega desetak posto, dok je kod sedmog SPAD-a ta razlika nešto manja od 4%. Iznosi naknadnog pulsiranja najmanji su kod sedmog SPAD-a kod kojeg se, u odnosu na prvi, smanjila površina katode te se malo mijenjaju s porastom napona viška. Zbog toga se može zaključiti da je i po pitanju naknadnog pulsiranja najpogodnija struktura za SPAD ona sa smanjenom površinom katode.

U nastavku je prikazana tablica sa izdvojenim rezultatima mjerenja za $V_{EX}=2$ V (Tablica 11). Iz tablice se vidi da najveći utjecaj na frekvenciju tamnih impulsa i postotak naknadnog pulsiranja za isti iznos napona viška imaju četvrti i šesti SPAD-a. To su SPAD-ovi kod kojih se, u odnosu na prvi, mijenjala veličina p-otoka, odnosno n-otoka, koji čine pn-spoj. Za naknadno pulsiranje potrebno je spomenuti i peti SPAD kod kojeg se povećala koncentracija p-otoka koji čini pn-spoj. Ostale su promjene strukture SPAD-a uzrokovale smanjenje naknadnog pulsiranja. Kod frekvencije tamnih impulsa, vidi se da su smanjenje DCR-a u

odnosu na prvi SPAD uzrokovali dodatni n-otok u okolici pn-spoja, povećanje koncentracije p-otoka koji čini pn-spoj te smanjenje površine katode.

Tablica 11 Prikaz DCR-a i naknadnog pulsiranja SPAD-ova za $V_{EX}=2$ V

Broj SPAD-a	Probojni napon, V	DCR, HZ	Naknadno pulsiranje, %
1	92.9	2645.4	-7.92
2	90.0	1175.3	-1.64
3	93.2	3235.7	-4.86
4	91.7	6312.6	-14.80
5	47.7	1271.4	-18.92
6	91.7	6375.7	-13.11
7	107.3	264.5	0.20

Zaključak

Nakon provedenih mjerenja, utvrdilo se da značajan utjecaj na probojni napon imaju promjena veličine aktivnog područja te promjena promjera katode, dok je utjecaj ostalih promjena geometrijske strukture i tehnoloških parametara bio zanemariv. Kod mjerenja frekvencije tamnih impulsa vidjelo se da značajan utjecaj na DCR imaju promjena površine aktivnog područja, promjene koncentracija otoka koji stvaraju pn-spoj te promjena površine katode. Jedini slučaj kada se DCR uspio smanjiti u odnosu na početnu strukturu je bilo prilikom smanjenja promjera katoda, odnosno smanjenja površine katode. Naknadno pulsiranje se također značajno smanjilo samo kod slučaja sa smanjenom površinom katode. Zbog tih činjenica, može se zaključiti da je najpogodnija struktura za SPAD-ove ona sa smanjenom površinom katode.

Literatura

- [1] Richard Simons, *The evolution of single-photon detection*, Laser Focus World, (2021, prosinac). Poveznica: <https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/14213833/the-evolution-of-single-photon-detection>; pristupljeno 14. svibnja 2024.
- [2] *Fotoelektrični efekt*, Wikipedia, (2022, rujan). Poveznica: https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotoelektri%C4%8Dni_u%C4%8Dinak; pristupljeno 14. svibnja 2024.
- [3] *Photodiode*, Wikipedia, (2024, lipanj). Poveznica: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>; pristupljeno: 20. lipnja 2024.
- [4] *p-n junction*, Wikipedia, (2024, svibanj). Poveznica: <https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93junction>; pristupljeno: 23. svibnja 2024.
- [5] *The Ultimate Guide to Analog Sensors*, HardwareBee. Poveznica: <https://hardwarebee.com/analog-sensors/>; pristupljeno 23. lipnja 2024.
- [6] *Fotodioda*, Wikipedia, (2022, siječanj). Poveznica: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Fotodioda>; pristupljeno: 23.6.2024.
- [7] *Avalanche photodiode*, Wikipedia, (2024, svibanj). Poveznica: https://en.wikipedia.org/wiki/Avalanche_photodiode; pristupljeno: 15. lipnja 2024.
- [8] Aull, B. F., Loomis, A. H., Young, D. J., Heinrichs, R. M., Felton, B. J., Daniels, P. J., Landers, D. J., *Geiger-Mode Avalanche Photodiodes for Three-Dimensional Imaging*, Lincoln Laboratory Journal, 13, 2 (2002), str. 335-350.
- [9] Dalla Betta, G.-F., Panzeri, L., Stoppa, D., Henderson, R., Richardson, J. *Advances in Photodiodes*, InTech, 2011.
- [10] Cusini, I., Berretta, D., Conca E., Incoronato, A., Madonini, F., Maurina A. A., Nonne C., Riccardo, S., Villa, F., *Historical Perspectives, State of the Art and Research Trends of SPAD Arrays and Their Applications (Part II: SPAD Arrays)*, Frontiers in Physics, 10, 906671, (2022)
- [11] *Single-photon avalanche diode*, Wikipedia, (2024, travanj). Poveznica: https://en.wikipedia.org/wiki/Single-photon_avalanche_diode; pristupljeno: 5. lipnja 2024.

- [12] *PN-spoj*, Tehnički leksikon, (2007), mrežno izdanje. Poveznica: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/pn-spoj>; pristupljeno: 5. lipanj 2024.
- [13] Becker, H. N., Johnston, A. H., *Dark Current Degradation of Near Infrared Avalanche Photodiodes From Proton Irradiation*, IEEE Transactions on Nuclear Science, 51, 6 (2004), str. 3572-3578
- [14] Bronzi, D., *Front-Side and Back-Side Illuminated SPAD Arrays for 2D Imaging and 3D Ranging*. Doktorski rad. Politecnico di Milano, 2014.
- [15] Cusini, I., Berretta, D., Conca E., Incoronato, A., Madonini, F., Maurina A. A., Nonne C., Riccardo, S., Villa, F., *Historical Perspectives, State of the Art and Research Trends of Single Photon Avalanche Diodes Arrays and Their Applications (Part I: Single Pixels)*, Frontiers in Physics, 10, 906675, (2022)
- [16] Ceccarelli, F., Acconcia, G., Gulinatti, A., Ghioni, M., Rech, I., Osellame, R., *Recent Advances and Future Perspectives of Single-Photon Avalanche Diodes for Quantum Photonics Application*, Advanced Quantum Technologies, 4, 2 (2021)
- [17] Bronzi, D., Villa, F., Bellisai, S., Tisa, S., Ripamonti G., Tosi, A., *Figures of Merit for CMOS SPADs and arrays*, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 8773, 04 (2013)
- [18] Zhang, Chao, *CMOS SPAD Sensors for 3D Time-of-Flight Imaging, LiDAR and Ultra-High Speed Cameras*. Doktorski rad. Delft University of Technology, 2019.
- [19] Gramuglia, F., *High-Performance CMOS SPAD-Based Sensors for Time-of-Flight PET Applications*. Doktorski rad. Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, 2022.
- [20] Charbon, E., *SPAD Image Sensors for Quantum and Classical Imaging*, STO Meetings proceedings, (2024)

Sažetak

Analiza integriranih lavinskih fotodioda za detekciju jednog fotona

Lavinske fotodiode za detekciju jednog fotona (engl. *Single Photon Avalanche Diode, SPAD*) su pn-spojevi koji rade u Geigerovom režimu te električni signal izaziva jedan foton. Parametri SPAD-a su frekvencija tamnih impulsa, naknadno pulsiranje, efikasnost detekcije fotona, mrtvo vrijeme te vremenska rezolucija. Fokus rada bio je na mjerenju tamnih impulsa, izračunu parametara koji ovise o tamnim impulsima (frekvencija tamnih impulsa i naknadno pulsiranje) te objasniti kako različiti tehnološki parametri i geometrije struktura utječu na te parametre. Mjerile su se karakteristike sedam različitih SPAD-ova koji se razlikuju po karakteristikama katoda. Mjerenja su se odvijala sa *wafer*-om u *dark box*-u uz pomoć SMU-a te oscilatora.

Ključne riječi: lavinska fotodiode za detekciju jednog fotona, tamni impulsi, frekvencija tamnih impulsa, naknadno pulsiranje

Summary

Analysis of integrated single photon avalanche photodiodes

Single photon avalanche diodes (SPADs) are pn-junctions working in Geiger mode in which one photon produces an electrical signal. Parameters of SPADs are dark count rate, afterpulsing, photon detection efficiency, dead time and timing resolution (jitter). The main focus of this thesis was measuring dark counts, calculating parameters which depend on dark counts (dark count rate and afterpulsing) and to explain how different technological parameters and geometry structures influence these parameters. The characteristics of seven different SPADs were measured which differed by the characteristics of their cathodes. The measurements were performed with the wafer in a dark box with a source measure unit and an oscilloscope.

Key words: single photon avalanche diode, dark counts, dark count rate, afterpulsing