

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Ivan Berdalović, Željko Osrečki, Filip Šegmanović

**Projektiranje sklopova za potiskivanje proboja
fotodioda za detekciju jednog fotona**

Zagreb, travanj 2016.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za elektroniku, mikroelektroniku, računalne i inteligentne sustave pod vodstvom prof. dr. sc. Tomislava Suligoja i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015./2016.

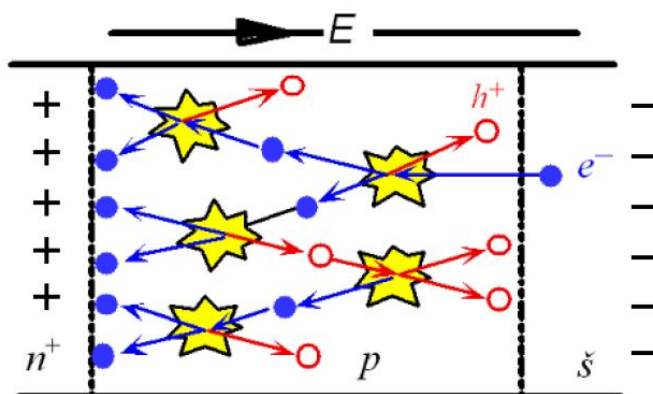
Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Analiza fotodiode za detekciju jednog fotona	7
3. Projektiranje sklopova za potiskivanje proboja.....	11
4. Realizacija sklopova za potiskivanje proboja	18
4.1. Pasivni sklop za potiskivanje proboja s pasivnim resetom	18
4.2. Pasivni sklop s aktivnim resetom bez vremena odgode.....	20
4.3. Pasivni sklop s aktivnim resetom i podesivim vremenom odgode.....	23
5. Zaključak.....	33
6. Zahvala	34
7. Literatura.....	35
8. Sažetak.....	37
9. Summary.....	38

1. Uvod

Fotodiode s lavinskom multiplikacijom za detekciju jednog fotona (engl. *Single-photon avalanche diode, SPAD*) su fotodetektor koji se koriste u sustavima gdje je bitno detektirati optičke signale malog intenziteta [1]. SPAD-ovi su zbog niske cijene, malenih dimenzija, nižeg radnog napona te veće kvantne efikasnosti zamijenili fotomultiplikacijske cijevi (engl. *Photomultiplier tubes – PMT*) u mnogim današnjim primjenama. SPAD je zapravo *p-n* spoj koji radi pri reverznom naponu višem od probojnog napona, za razliku od standardnih lavinskih fotodioda (engl. *Avalanche photodiode – APD*) koje rade pri naponu nižem od probojnog napona.

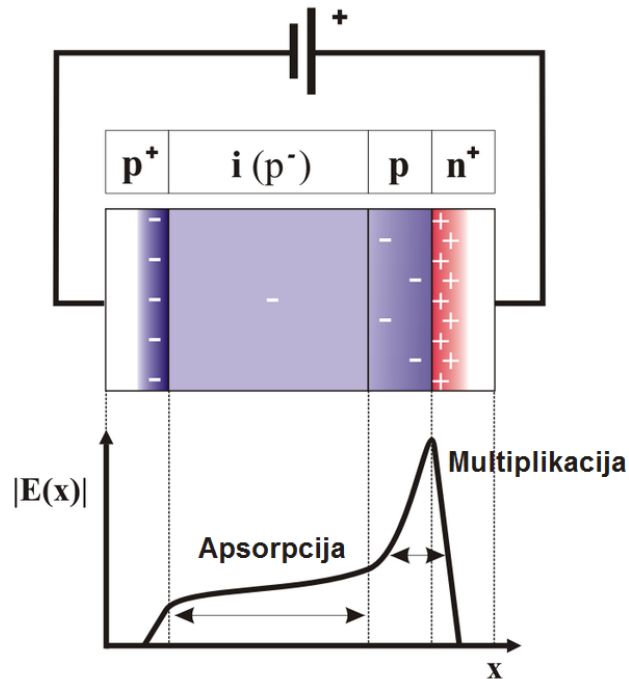
Veliki napon zaporne polarizacije doveden na kontakte APD-a uzrokuje jako električno polje unutar osiromašenog područja te ono može ubrzati generirane nosioce tako da oni sudaranjem s drugim atomima stvaraju nove parove elektron-šupljina. Ta se pojava naziva udarna ionizacija (engl. *Impact ionization*). Udarno ionizirani nosioci mogu ponovnim sudaranjem stvoriti nove parove nosioca, te tako dolazi do lavinskog efekta u kojem će se stvarati sve više nosioca i na taj se način detektirani signal pojačava. Taj se proces naziva lavinska multiplikacija (engl. *Avalanche multiplication*) [2] i prikazan je na slici 1.



Slika 1. Lavinska multiplikacija nosilaca

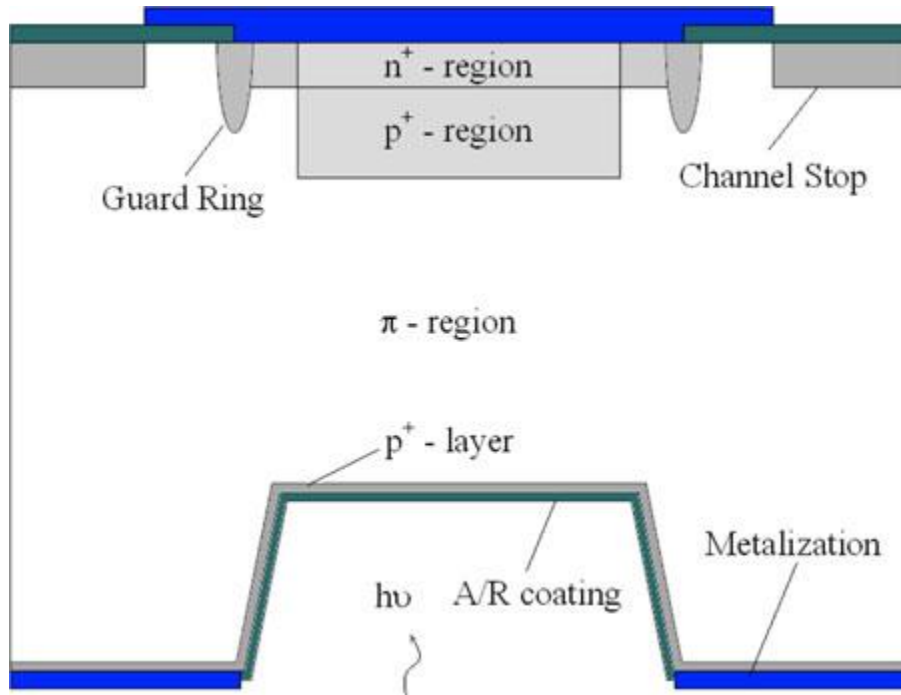
Područje u kojem se događa multiplikacija trebalo bi biti usko kako bi se spriječile nekontrolirane lavine uzrokovane jakim električnim poljem. Lavinske fotodiode se najčešće izvode na način da se razdvoji područje u kojem se fotoni

apsorbiraju od područja u kojem se događa multiplikacija (engl. *Separate-absorption-multiplication avalanche photodiode*, SAM-APD). Ovakva izvedba poprima oblik $p^+i\text{-}p\text{-}n^+$ strukture, koja je zajedno s raspodjelom električnog polja u takvoj strukturi prikazana na slici 2.



Slika 2. Struktura lavinske fotodiode s odvojenom apsorpcijom i multiplikacijom

Za razliku od standardnih lavinskih fotodiode, SPAD radi u impulsnom načinu rada gdje jedan foton može uzrokovati pojavu lavinske multiplikacije. Struktura ovakve fotodiode, koja će se koristiti pri realizaciji sklopova u ovom radu, prikazana je na slici 3. Apsorpcijsko područje nalazi se između p^+ sloja i p područja i široko je $25\ \mu\text{m}$ [3]. U ovom području dolazi do generacije nosioca prilikom upada fotona. Donji dio i neaktivni gornji dio diode pokriveni su slojem metala koji poboljšava generaciju nosioca u apsorpcijskom sloju. Na rubu multiplikacijskog područja, koje se nalazi između n^+ i p područja, nalazi se zaštitni prsten (engl. *Guard ring*) koji sprječava preuranjeni proboj diode na rubovima (engl. *Premature edge breakdown*, PEB). Dioda je u normalnom načinu rada osvjetljena sa donje strane (engl. *Back-illuminated*).



Slika 3. Struktura SPAD-a [3]

Za vrijeme lavinske multiplikacije, struja kroz diodu naglo poraste sve dok se lavina ne prekine pomoću sklopa za potiskivanje proboja (engl. *Quenching circuit*). Rastući brid impulsa struje daje nam informaciju o vremenu upada fotona. Do lavinske multiplikacije također može doći zbog termički generiranih parova elektron-šupljina u aktivnim područjima ili zbog pražnjenja naboja koji su bili uskladišteni u zamkama (engl. *Traps*) [3]. Zbog tih mehanizama raste frekvencija tamnih impulsa (engl. *Dark count rate, DCR*), što zapravo predstavlja šum samih SPAD-ova. Također, zbog pražnjenja tih zamki može doći do pojave naknadnih impulsa (engl. *Afterpulse*) [4], a cilj ih je izbjeći, ili u najgorem slučaju smanjiti frekvenciju njihova pojavljivanja.

Nakon što se lavina pokrene, ona je samoodržavajuća, sve dok se ne prekine sklopom za potiskivanje proboja, tijekom vremena koje se zove vrijeme potiskivanja. Sklop za potiskivanje, uz zaustavljanje lavinske multiplikacije, treba i detektirati lavinu, prouzrokovati dovoljan impuls na izlazu sklopa te pripremiti diodu za nove detekcije. Vrijeme za koje sklop to obavlja zove se mrtvo vrijeme (engl. *Dead time*) [5, 6]. To vrijeme ograničava maksimalnu radnu frekvenciju SPAD-ova, jer za to vrijeme dioda ne može detektirati nove fotone.

Postoje dvije osnovne izvedbe sklopa za potiskivanje proboja: pasivni i aktivni sklop. Pasivni sklop zaustavlja lavinsku multiplikaciju time što spusti napon na diodi ispod probojnog napona pomoću velikog otpornika koji je spojen u seriju s diodom. Struja lavinske multiplikacije, uzrokovana probojem fotodiode, teče kroz taj otpornik te na njemu stvara pad napona zbog kojeg se napon na samoj diodi smanjuje ispod probojnog napona, te se lavinska multiplikacija zaustavlja [7]. Aktivni sklop za potiskivanje proboja koristi dodatno sklopovlje za zaustavljanje lavine, čime se postižu bolje performanse (brži sklop), no nedostatak predstavlja složenost dodatnog sklopovlja [8]. Nakon što se lavinska multiplikacija zaustavi, potrebno je napon na diodi vratiti iznad proboja kako bi dioda bila spremna za nove detekcije. To se može izvesti pasivno (dugo vrijeme resetiranja, ali jednostavan sklop) ili aktivno (kratko vrijeme resetiranja, ali složeniji sklop).

Vrsta sklopa određuje radi li SPAD u slobodnom (engl. *Free-running mode*) ili upravljanoj načinu rada (engl. *Gated mode*). U slobodnom načinu rada, na diodi je konstantno postavljen napon viši od probojnog napona, za razliku od upravljanog načina rada, gdje se u određenim trenucima napon periodično smanjuje. U upravljanoj načinu, dioda je aktivna samo kada se foton treba detektirati, pa zbog toga frekvencija upadnih fotona mora biti unaprijed poznata. U slobodnom načinu rada, dioda detektira slučajne upade fotona te je jedino ograničena mrtvim vremenom potrebnim da se lavina zaustavi i da se napon vrati iznad probojnog napona. Vrijeme reseta je vrijeme za koje se napon na diodi vrati na radni napon (engl. *Operating voltage*). Za vrijeme resetiranja, napon na diodi je i dalje iznad probojnog napona te još uvijek može doći do lavinske multiplikacije. Zbog toga mora postojati određeno vrijeme poslije zaustavljanja lavine i prije resetiranja, tijekom kojeg će se preostali naboj ukloniti iz diode. To se vrijeme naziva vrijeme odgode (engl. *Hold-off time*) [5]. Naboj koji se ne izbije može uzrokovati pojavu naknadnih impulsa (engl. *Afterpulsing*) za vrijeme i nakon resetiranja, smanjujući vjerojatnost za detekciju novih fotona. Kao kompromis između složenosti sklopa i njegovih performansi, pasivni sklop s aktivnim resetom pasivno zaustavlja lavinu, te aktivno vraća (resetira) radni napon SPAD-a, čime se smanjuje vrijeme resetiranja [9]. Postoje razne izvedbe sprječavanja naknadnih impulsa, poput promjenjivog tereta [10] i upravljanog PQAR sklopa [11]. Monolitne izvedbe sklopova za potiskivanje

proboja imaju manje parazitne kapacitete, pa samim time i bolje performanse [12, 13].

Fotodioda može biti izvedena sa dodatnim sklopovljem u istom kućištu. Ovakva izvedba prikazana je na slici 4. Najčešće se ugrađuje pojačalo koje je potrebno da bi se signali fotodiode male amplitude mogli očitati i koristiti u daljnjoj obradi. Sklopovlje potrebno za rad fotodiode ne smije utjecati na rad same diode jer vrlo mali signali mogu uzrokovati lavinsku multiplikaciju.



Slika 4. Fotodioda s lavinskom multiplikacijom s ugrađenim pojačalom

Na slici 5. prikazan je spektrometar koji koristi SPAD za detekciju fotona.

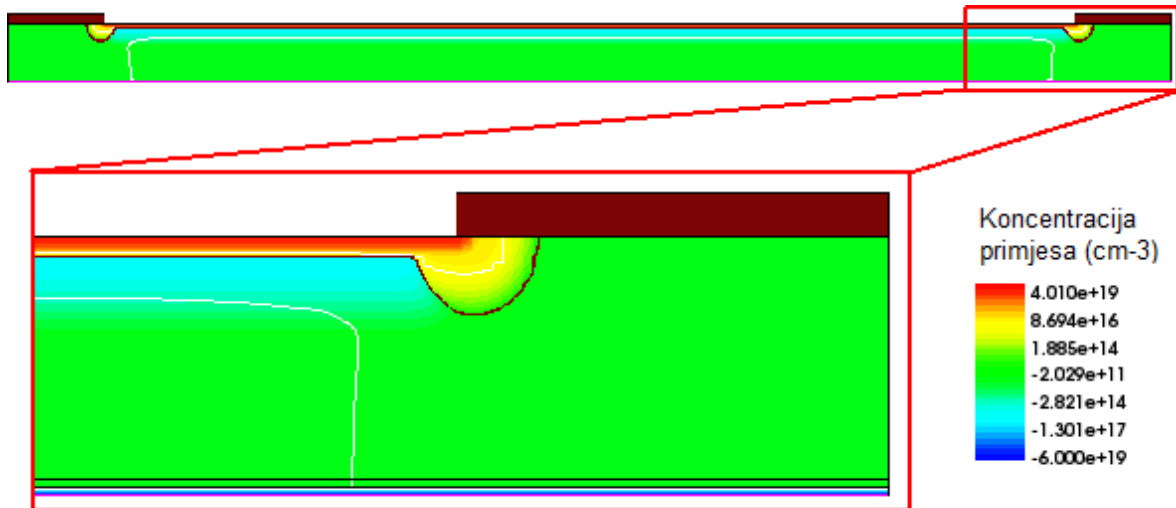


Slika 5. Spektrometar koji u svom radu koristi SPAD

U ovom radu projektirat će se pasivni sklop za potiskivanje proboja s aktivnim resetiranjem i podesivim vremenom odgode. Prvo će se provesti simulacije u programu *ADS (Advanced Design System)*, a nakon toga će se projektirati jednostavan pasivni sklop pomoću kojeg će se izmjeriti valni oblici napona na diodi i struje prouzrokovane lavinskom multiplikacijom. Na taj će se sklop zatim dodati sklopovlje za aktivno resetiranje, i to pomoću tranzistorske sklopke u paraleli s velikim otpornikom koji je služio za pasivno potiskivanje proboja. Kada aktivno resetiranje započinje prije nego je pasivno potiskivanje proboja završilo, lavinska multiplikacija nije u potpunosti zaustavljena i sklop ne radi ispravno. Zbog toga se uvodi vrijeme odgode između potiskivanja i reseta, a ono je postignuto dodatnim sklopovljem koje služi da zakasni signal kako bi prošlo dovoljno vremena između zaustavljanja lavine i aktivnog resetiranja. S ciljem optimizacije sklopa, konačan sklop sastavljen od diskretnih komponenata omogućuje podesivo vrijeme zadržavanja. Takav se sklop može koristiti kako bi se utvrdilo minimalno vrijeme odgode za pojedine fotodiode, i to s obzirom na frekvenciju naknadnih impulsa i frekvenciju upadnih nosilaca. Kako je riječ o sklopu koji radi u slobodnom načinu rada, kao pobuda se mogu koristiti tamni impulsi (engl. *Dark counts*), koji uzrokuju lavinsku multiplikaciju u svim mjerenjima.

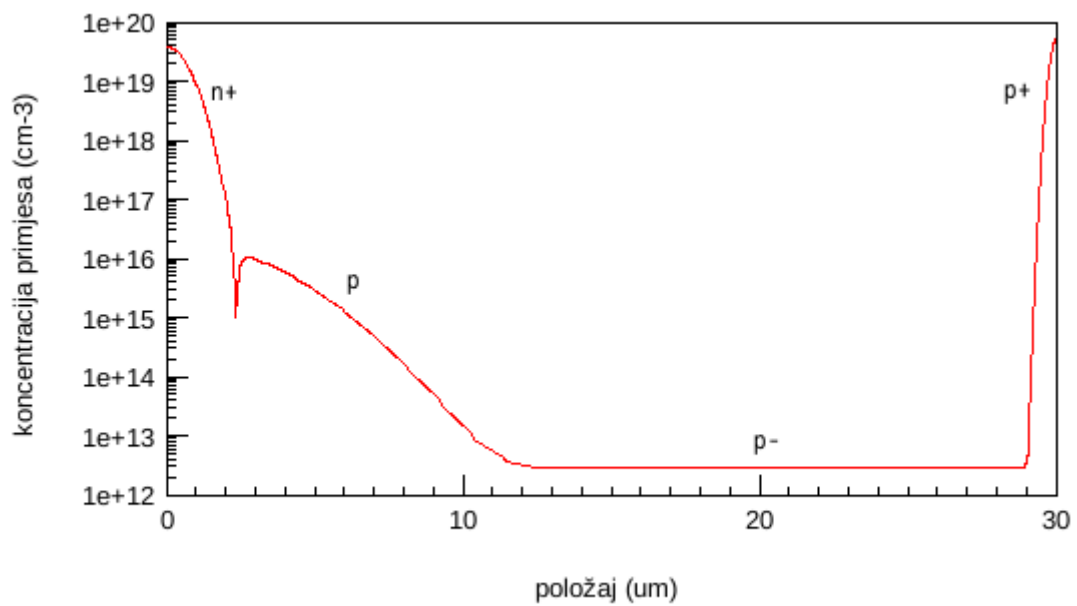
2. Analiza fotodiode za detekciju jednog fotona

Fotodiode korištena pri projektiranju sklopova za potiskivanje proboja je SAP500 proizvođača Laser Components DG [15]. Kako bismo pobliže objasnili rad te fotodiode, prije samog projektiranja sklopova provedene su TCAD simulacije fotodiode. Zato je u programu TCAD *Sentaurus* definirana struktura vrlo slična strukturi stvarne fotodiode, s istim koncentracijama primjesa u aktivnom dijelu te zaštitnim prstenovima za sprječavanje preuranjenog proboja na rubovima. Izgled te strukture zajedno s koncentracijama primjesa prikazan je na slici 6.



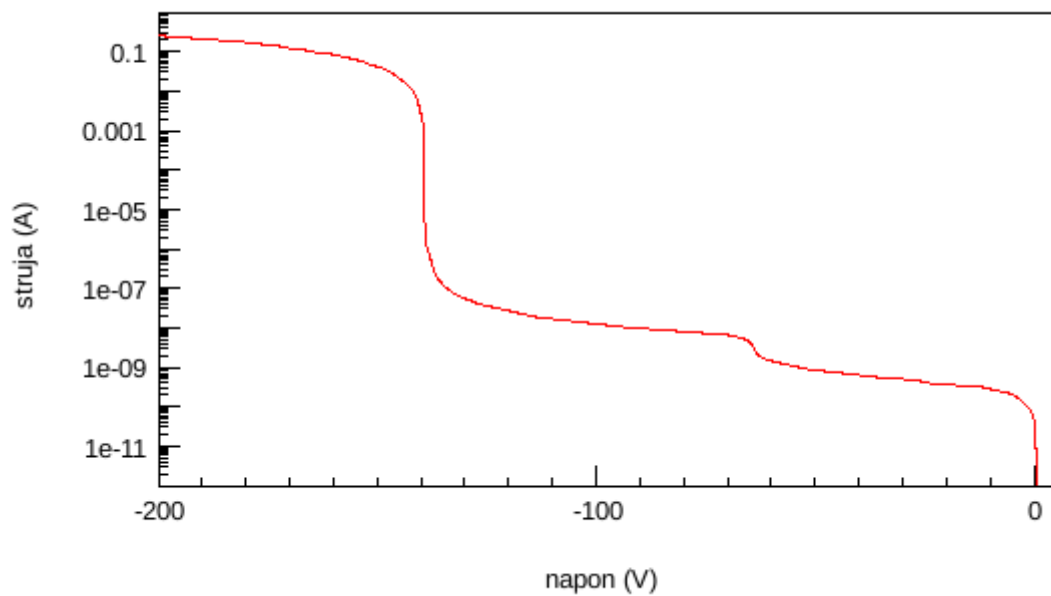
Slika 6. 2D struktura korištene fotodiode s uvećanim prikazom zaštitnog prstena

Spomenuli smo da se radi o p⁺-π-p-n⁺ strukturi, a koncentracije primjesa u središnjem, aktivnom dijelu ravnaju se kao što je prikazano na slici 7.



Slika 7. Profil primjesa u aktivnom dijelu strukture

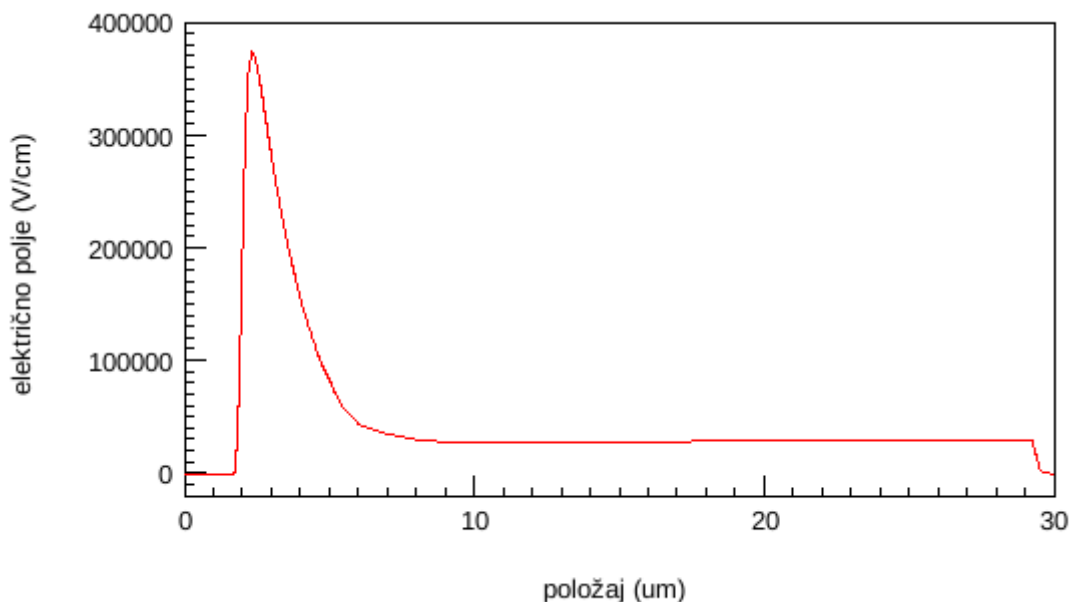
Za ovu strukturu simulirana je strujno-naponska karakteristika pri reverznoj polarizaciji za slučaj neosvijetljene fotodiode, te je ona prikazana na slici 8.



Slika 8. Strujno-naponska karakteristika fotodiode

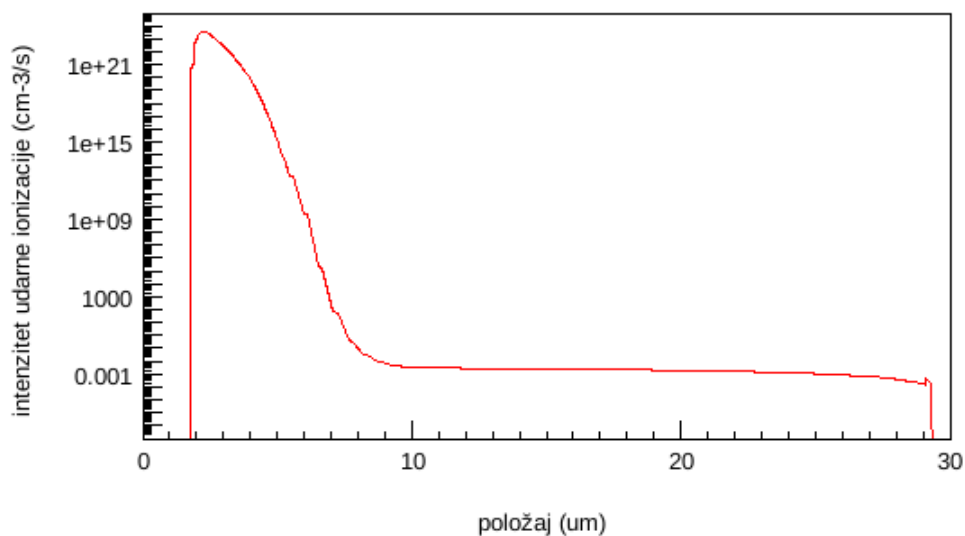
Vidimo da pri reverznom naponu od oko 65 V dolazi do blagog porasta tamne struje fotodiode, jer se kod tog napona osiromašeno područje proširi na cijeli apsorpcijski sloj. Međutim, do naglog porasta struje, tj. do lavinske multiplikacije i proboja dolazi tek pri naponu od oko 140 V, što je u skladu s probojnim naponom stvarne fotodiode. Pri još višim naponima do izražaja dolazi serijski otpor diode koji ograničava struju.

U Geigerovom režimu rada, fotodiode radi pri naponu većem od probojnog napona. Zato su promotrene karakteristike ove strukture pri reverznom naponu od 145 V. Raspodjela vertikalnog električnog polja u središnjem dijelu strukture prikazana je na slici 9.



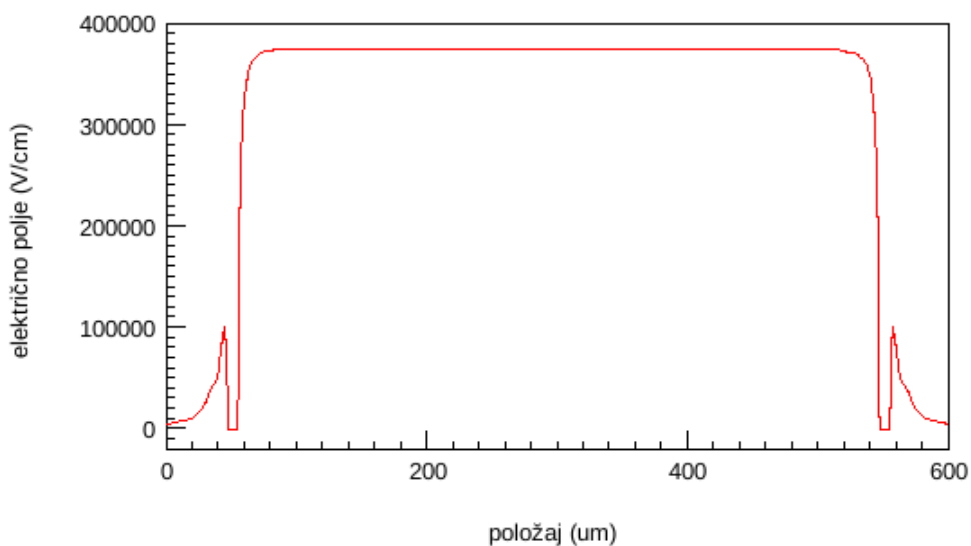
Slika 9. Raspodjela vertikalnog električnog polja u aktivnom dijelu strukture

Vidljivo je da je električno polje najjače u blizini $p-n$ spoja – to je područje multiplikacije nosilaca. Međutim, polje postoji i u širokom, gotovo intrinzičnom području, te ovo područje predstavlja apsorpcijski sloj fotodiode. To se vidi i ako se iscrta intenzitet udarne ionizacije, na slici 10. U multiplikacijskom području intenzitet udarne ionizacije je vrlo visok, dok je u apsorpcijskom području ona zanemariva.



Slika 10. Raspodjela intenziteta udarne ionizacije u strukturi

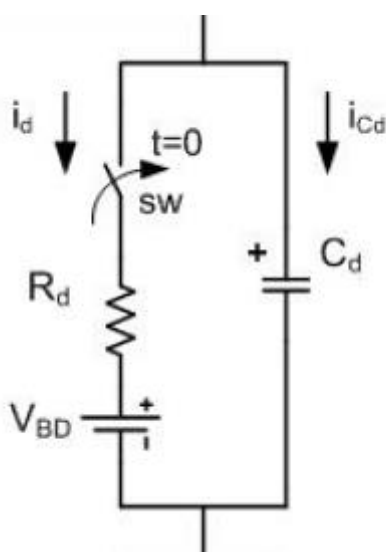
Osim toga, na slici 11 prikazana je i raspodjela lateralnog električnog polja, i to na samom $p-n$ spoju, gdje je ono najvećeg iznosa. Ovdje vidimo da je električno polje maksimalno upravo u središnjem, aktivnom dijelu, dok je polje na rubovima gotovo četiri puta slabije. To znači da zbog zaštitnih prstenova nema preuranjenog proboja na rubovima, te da fotodioda prema očekivanjima probija u aktivnom dijelu.



Slika 11. Raspodjela lateralnog električnog polja na $p-n$ spoju

3. Projektiranje sklopova za potiskivanje proboja

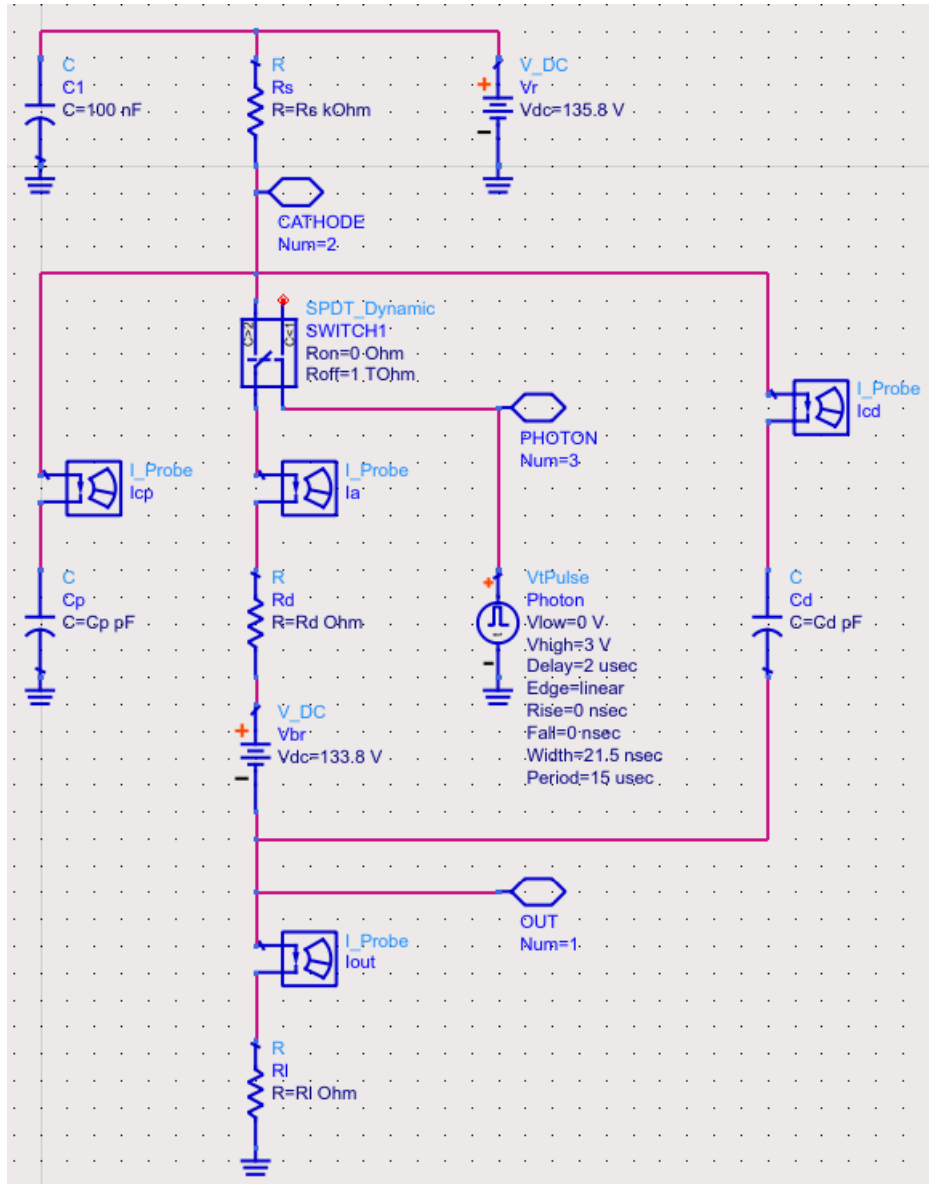
Prije izrade sklopova proveli smo i sklopovske simulacije u programu Advanced Design System (ADS) kako bismo ustvrdili rade li sklopovi ispravno. Međutim, u ADS-u ne postoji model SPAD fotodiode kojeg bismo koristili za simulacije, pa je bilo potrebno pronaći nadomjesni model koji bi se ponašao kao i fotodiode. Najjednostavniji nadomjesni model za lavinske fotodiode prikazan je na slici 12.



Slika 12. Nadomjesni model lavinske fotodiode

Model se sastoji od naponskog izvora V_{BD} , čiji je napon jednak probojnom naponu fotodiode, serijskog otpora R_d , kapaciteta $p-n$ spoja C_d i sklopke koja modelira upad fotona. Dok je sklopka otvorena, kroz diodu ne teče struja, a kada se detektira foton, sklopka se zatvara i ako je dioda priključena na napon veći od probojnog napona kroz nju teče struja uslijed lavinske multiplikacije nosilaca.

Spomenuto je da se pasivni sklop za potiskivanje proboja sastoji od velikog otpornika u seriji s fotodiodom koji osigurava smanjenje napona fotodiode ispod probojnog napona. U ovom se sklopu, osim velikog otpornika R_s , nalazi i manji otpornik R_L , na kojemu mjerimo izlazni napon sklopa. Shema sklopa u programu ADS prikazana je na slici 13.



Slika 13. Shema pasivnog sklopa u ADS-u

Na shemi prepoznajemo nadomjesni model fotodiode koji se ponovno sastoji od izvora V_{br} , otpora R_d i kapaciteta C_d te sklopke s oznakom „SWITCH1“. Naponski izvor s oznakom „Photon“ proizvodi kratke impulse napona koji upravljaju zatvaranjem sklopke te na taj način simuliraju upadne fotone. Serija fotodiode i otpornika priključena je na napon on 135.8 V, što je 2 V iznad probojnog napona fotodiode. Osim toga, u shemu je uključen i parazitni kapacitet čvora katode C_p , te nekoliko ampermetara za mjerenje struje u pojedinim granama.

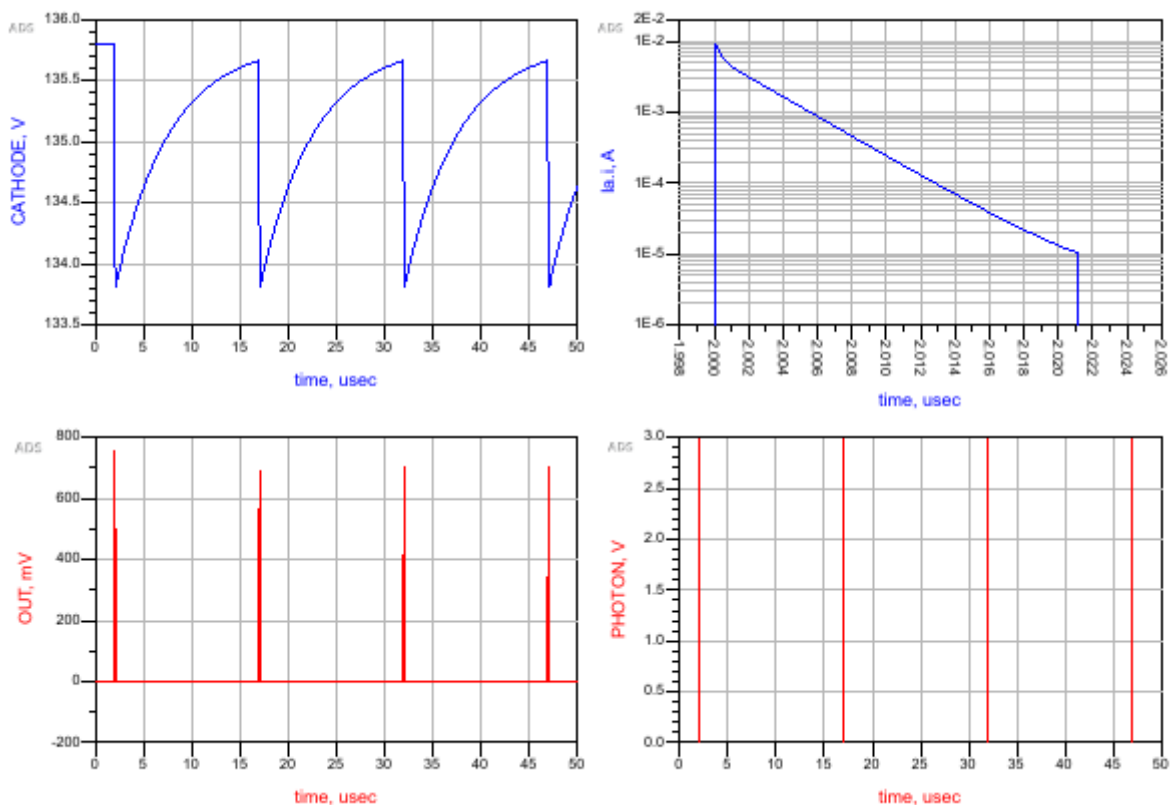
Iznosi otpornika i kapaciteta korištenih u simulaciji dani su u tablici 1. Za kapacitet C_d uzeta je vrijednost koju daje proizvođač fotodiode, dok su za ostale

vrijednosti uzete tipične vrijednosti koje su kasnije podešene da bi rezultati simulacija što bolje odgovarali stvarnim mjerenjima.

Tablica 1. Iznosi otpora i kapaciteta korišteni u simulaciji

R_s	560 k Ω
R_l	220 Ω
R_d	200 Ω
C_d	3.3 pF
C_p	6.6 pF

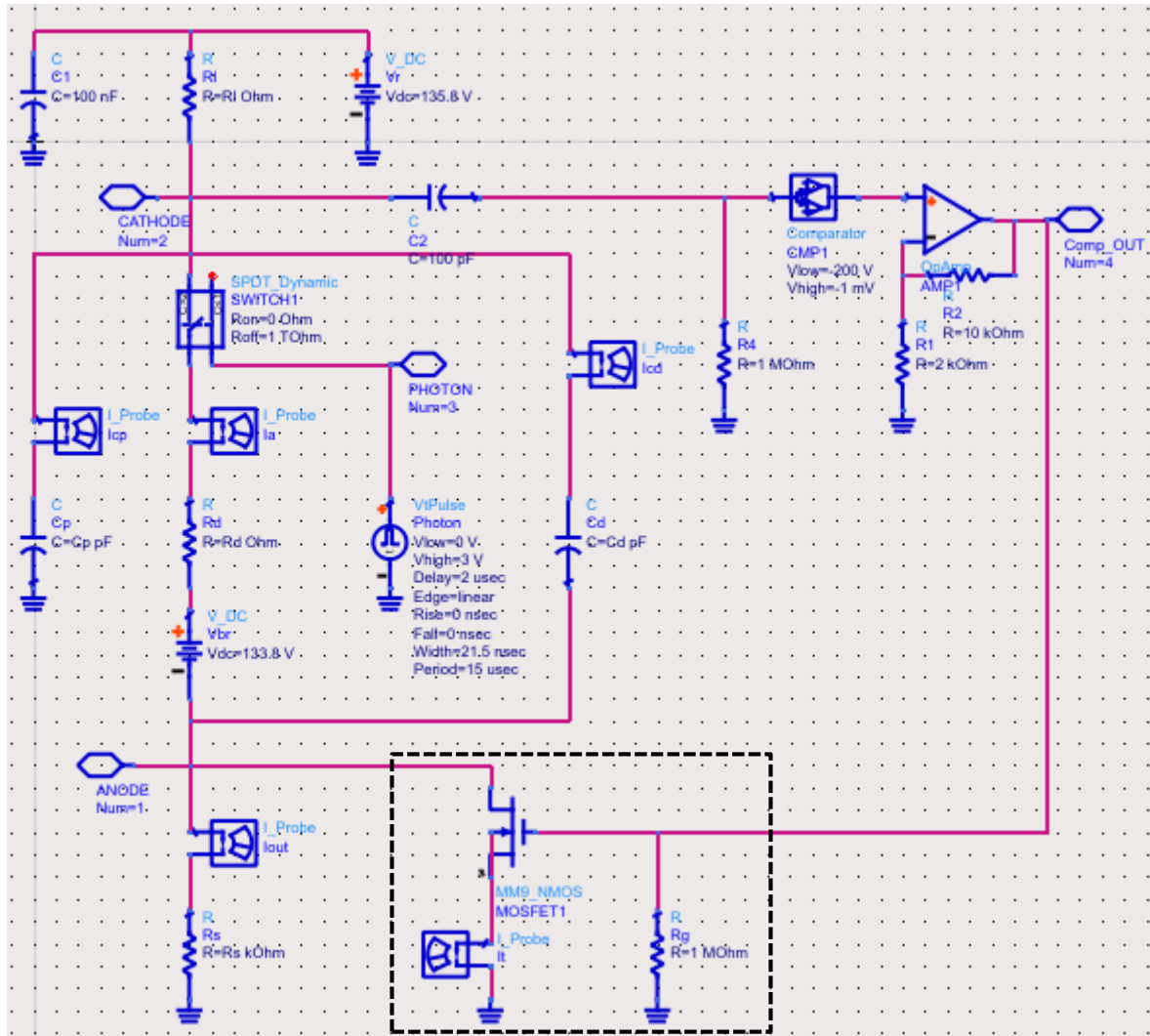
Rezultati simulacija prikazani su na slici 14.



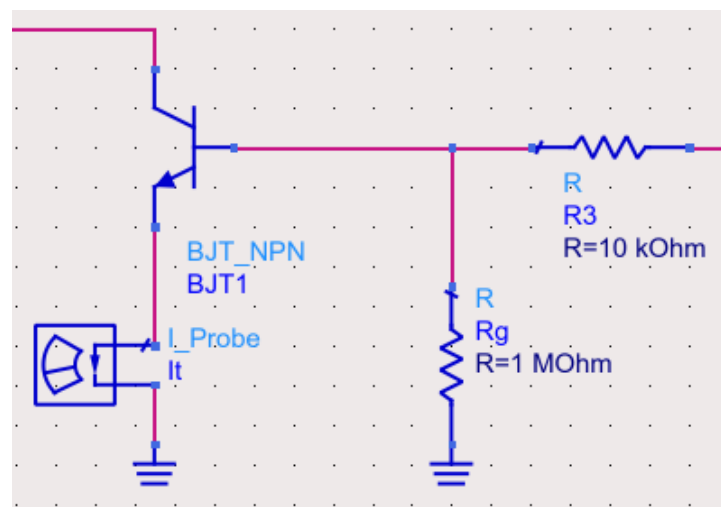
Slika 14. Rezultati simulacija pasivnog sklopa

Vidimo da kod svake detekcije fotona (impulsi napona s oznakom „PHOTON“ određuju trenutke upada fotona) poteče struja kroz diodu koja uzrokuje padove napona na otpornicima. Ta struja (I_a) odmah nakon detekcije fotona poraste na maksimalni iznos od oko 10 mA, a zatim dolazi do zaustavljanja lavinske multiplikacije, tj. smanjenja te struje vremenskom konstantom koju određuju otpor R_d i kapacitet C_d . Napon na izlazu (OUT) prati oblik struje kroz diodu, i vidimo da je vrijeme potiskivanja proboja vrlo kratko, oko 20 ns. Međutim, napon na katodi (CATHODE), nakon što je zbog protjecanja struje kroz R_S pao na iznos probojnog napona, vraća se na svoj početni iznos od 135.8 V vremenskom konstantom koju određuju sam R_S i kapacitet C_d . Zbog velikog iznosa R_S ta je vremenska konstanta vrlo velika, te je povratak napona katode blizu početne vrijednosti spor, oko 20 μ s. Upravo je to sporo „resetiranje“ glavni nedostatak sklopova s pasivnim potiskivanjem proboja, jer novi foton može se detektirati tek kada se napon diode poveća dovoljno iznad probojnog napona. Zbog toga smo pokušali smanjiti to vrijeme resetiranja korištenjem sklopa s pasivnim potiskivanjem proboja, ali aktivnim resetom.

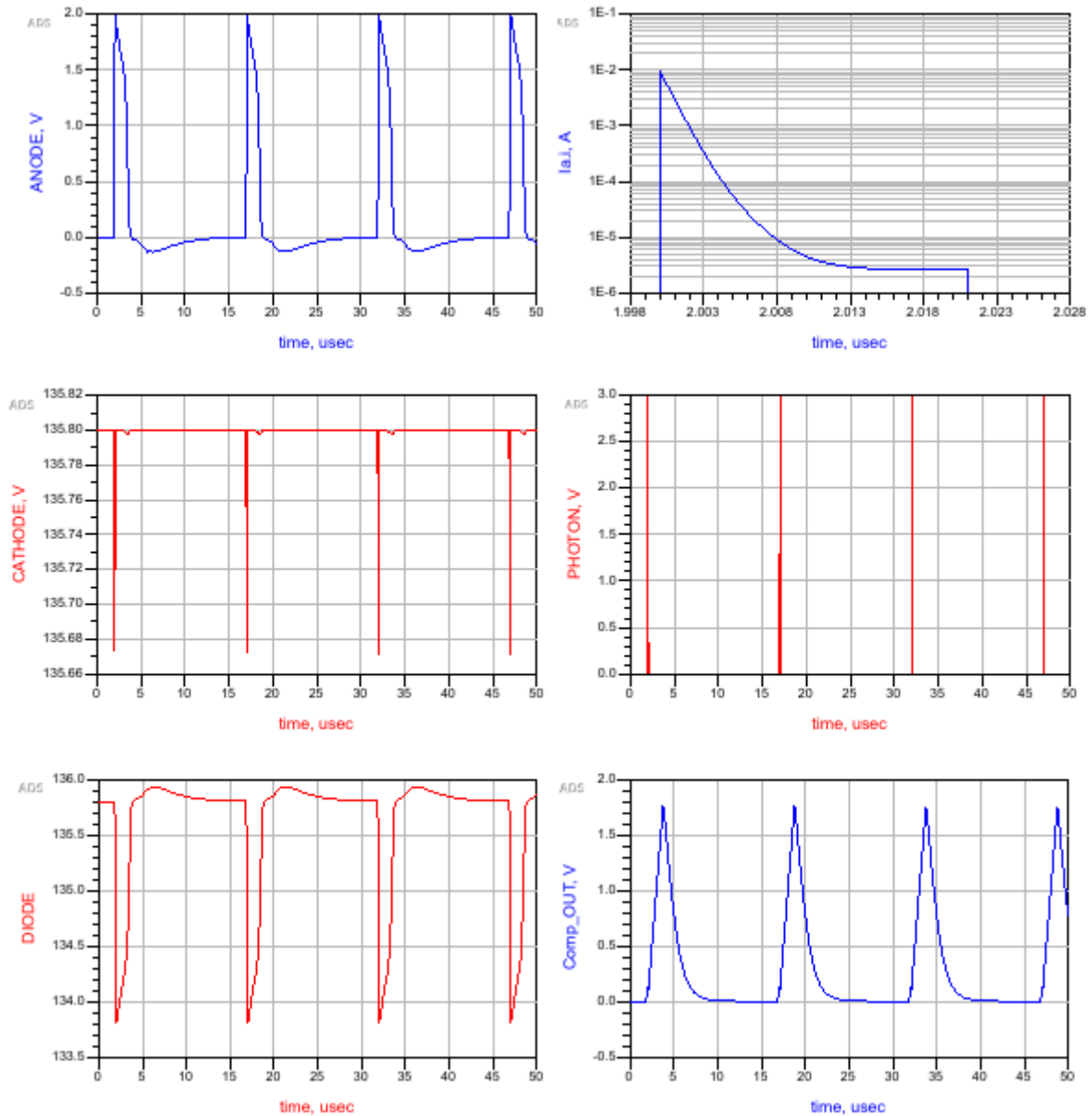
Vrijeme resetiranja bilo bi kraće da je otpor R_S manji, zato je ideja pasivnom sklopu dodati tranzistor koji bi nakon detekcije fotona i zaustavljanja lavine prešao u stanje vođenja, te bi mali otpor u vođenju tog tranzistora zamijenio veliki otpor R_S , čime bi se postigla manja vremenska konstanta i brže resetiranje. Shema sklopa s aktivnim resetom prikazana je na slici 7. Radi lakše izvedbe zamijenjeni su otpornici R_L i R_S kako bi se uvod korištenog MOSFET-a mogao spojiti na masu. Napon na upravljačkoj elektrodi FET-a dovodi se preko komparatora koji preko veznog kondenzatora detektira pad napona na katodi te na svom izlazu daje napon koji treba prebaciti FET u stanje vođenja. Budući da u ADS-u idealni komparator daje 1 V na izlazu, što nije dovoljno da bi tranzistor proveo, dodano je i neinvertirajuće pojačalo pojačanja $A_v=5$ kako bi se taj napon povećao. U prvoj izvedbi sklopa korišten je MOSFET tranzistor, no na sličan se način kao sklopka može koristiti i bipolarni tranzistor, i to ako se uokvireni dio na slici 15 zamijeni spojem sa slike 16. Rezultati simulacija u oba ova slučaja su vrlo slični, a valni oblici pojedinih napona i struja u sklopu s MOSFET-om prikazani su na slici 17.



Slika 15. Shema sklopa s aktivnim resetom



Slika 16. Spoj bipolarnog tranzistora kao sklopke



Slika 17. Rezultati simulacija sklopa s aktivnim resetom

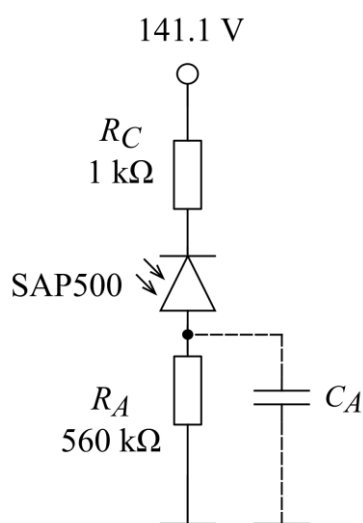
Dakle, komparator detektira impulse na katodi i na izlazu pojačala (Comp_OUT) dobivaju se impulsi koji upravljaju radom tranzistora. Zbog manje maksimalne brzine porasta izlaznog napona korištenog pojačala ti impulsi ne dostižu amplitudu od očekivanih 5 V, no dovoljni su da tranzistor potjeraju u vođenje. Nakon zaustavljanja lavine napon na anodi počne se polako resetirati, no čim tranzistor provede taj se napon brzo spušta na nulu, što znači da ukupni napon na diodi ponovno znatno iznad probojnog napona te da je dioda spremna za novu

detekciju. Vrijeme resetiranja ovdje iznosi oko 2 μ s, što je značajno ubrzanje u odnosu na pasivni sklop.

4. Realizacija sklopova za potiskivanje proboja

4.1. Pasivni sklop za potiskivanje proboja s pasivnim resetom

Pasivni sklop za potiskivanje proboja s pasivnim resetiranjem je osnovni sklop za zaustavljanje lavinske multiplikacije u fotiododi. Kao što je prikazano na slici 18, sastoji se od reverzno polarizirane lavinske fotiodode u seriji s otpornikom velikog iznosa, $R_A = 560 \text{ k}\Omega$, i otpornikom manjeg iznosa, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$.

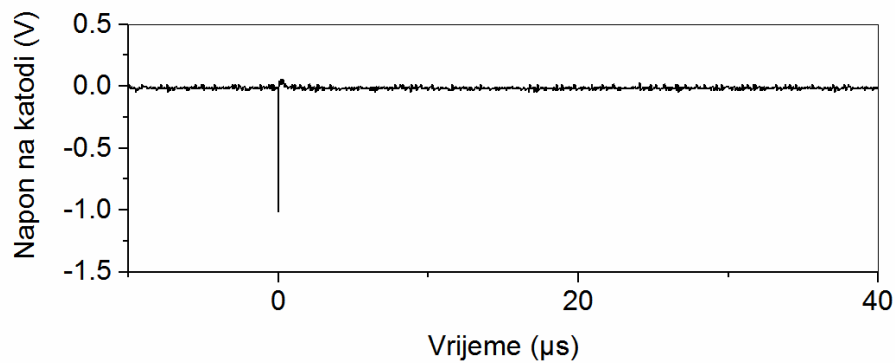


Slika 18. Shema pasivnog sklopa za potiskivanje proboja

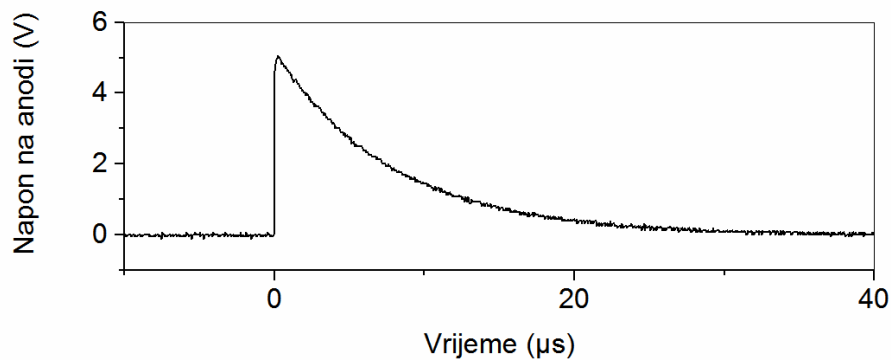
Radni napon korištene SAP500 fotiodode je $V_{OP} = 141.1 \text{ V}$, koji je viši od probojnog napona $V_{BR} = 139.1 \text{ V}$ za prenapon $V_{EX} = V_{OP} - V_{BR} = 2 \text{ V}$. Kada dođe do lavinske multiplikacije, struja kroz diodu naglo poraste, kao i napon na otporniku R_A , te zbog toga napon na samoj diodi pada ispod probojnog napona. Za to vrijeme, lavinska multiplikacija se zaustavlja te struja diode postaje neznatna. Pad napona na otporniku R_C , prikazan na slici 19 a), uzrokovan je stujom diode, pa je zbog toga valni oblik napona na katodi isti kao i valni oblik struje diode, prikazan uvećano na slici 20 (krivulja a). Može se primijetiti da je vrijeme gašenja lavine, odnosno vrijeme za koje struja uzrokovana lavinskom multiplikacijom padne, otprilike 50 ns.

Kako je R_A opterećen značajnim kapacitetom, i to ulaznim kapacitetom osciloskopa te ostalim parazitnim kapacitetima, struje kroz R_C i R_A su različite.

Većina struje diode se zapravo troši na nabijanje tih kapaciteta, pa samo manji dio te struje teče kroz R_A i uzrokuje pad napona od samo 5 V, kao što je prikazano na slici 20 b). Nakon što je lavinska multiplikacija zaustavljena, opterećeni kapacitet anode se mora izbiti preko otpornika R_A te napon padne na nulu za vrijeme određeno RC konstantom koju čine taj kapacitet i otpornik R_A . Kao što vidimo na slici 20 b), ta je vremenska konstanta prilično velika, pa vrijeme resetiranja diode iznosi otprilike 30 μs .



(a)

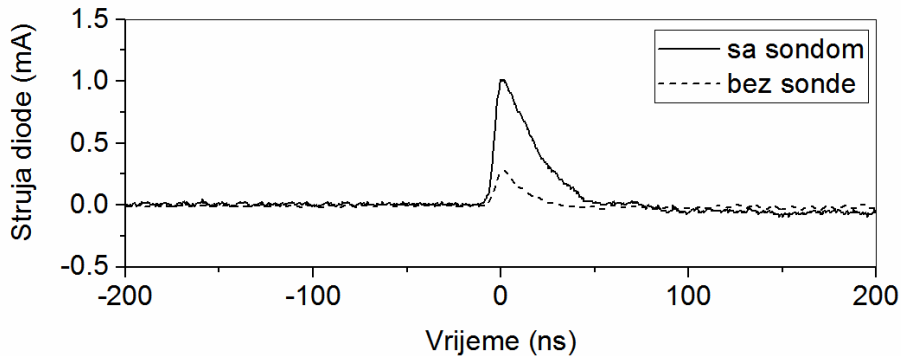


(b)

Slika 19. Vremenski odziv pasivnog sklopa za potiskivanje proboja: a) Izmjenično vezani napon na katodi, b) Napon na anodi

Do sada je opisan slučaj kada je sonda osciloskopa bila spojena na anodu. Kapacitet na anodi također određuje maksimalnu struju uzrokovanu lavinskom multiplikacijom. Kao što je prikazano na slici 20 (krivulja b), maksimalna struja bez

sonde osciloskopa spojene na anodu iznosi samo 0.3 mA, jer je manje struje potrebno za nabijanje manjeg kapaciteta C_A .

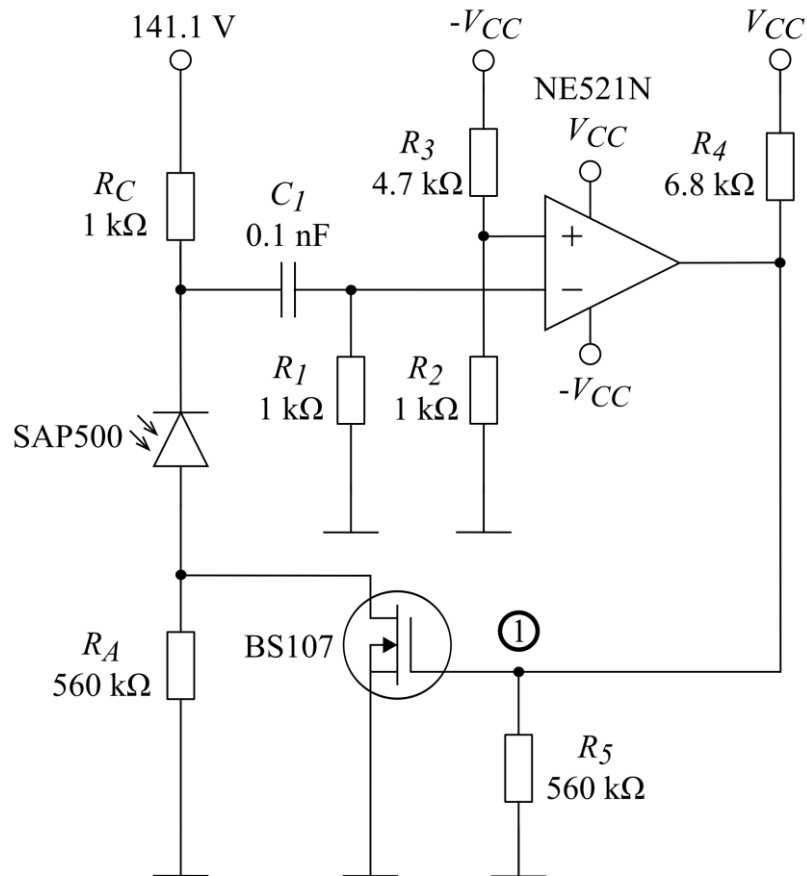


Slika 20. Vremenski odziv pasivnog sklopa: struja diode a) sa i b) bez sonde osciloskopa spojene na anodu

4.2. Pasivni sklop s aktivnim resetom bez vremena odgode

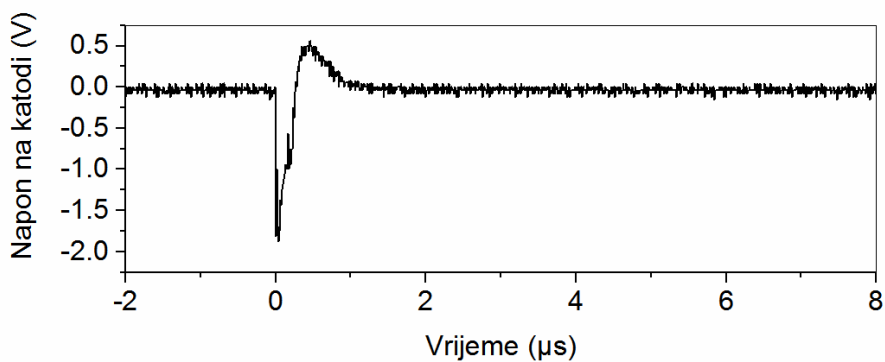
Kako bi se ubrzalo pasivno resetiranje, implementiran je pasivni sklop za potiskivanje proboja s aktivnim resetiranjem. Prvobitna ideja je bila koristiti komparator kako bi se detektirao pad napona na katodi. Izlaz komparatora je spojen na upravljačku elektrodu MOSFET tranzistora, i kada izlaz prijeđe u visoku razinu, tranzistor provede te spaja anodu na masu i time resetira sklop. Shema ovog sklopa je prikazana na slici 21.

Napon praga okidanja komparatora je određen korištenjem dva otpornika, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ i $R_3 = 4.7 \text{ k}\Omega$, koji su spojeni kao naponsko dijelilo od negativnog napona napajanja prema pozitivnom ulazu komparatora. Time se dobije napon praga okidanja od $V_{TR} = -0.85 \text{ V}$. Negativni ulaz komparatora je spojen na izmjenično vezanu katodu. Dakle, kada napon katode padne za više od 0.85 V, komparator provede. Izlazni kapacitet tranzistora (BS107) iznosi oko 30 pF, što je veće od ulaznog kapaciteta osciloskopa, pa je taj kapacitet dominantan parazitni kapacitet čvora anode. Zbog toga, maksimalna struja uzrokovana lavinskom multiplikacijom je oko 2 mA, a to uzrokuje pad napona na katodi od 2 V, što je više nego dovoljno da komparator provede.

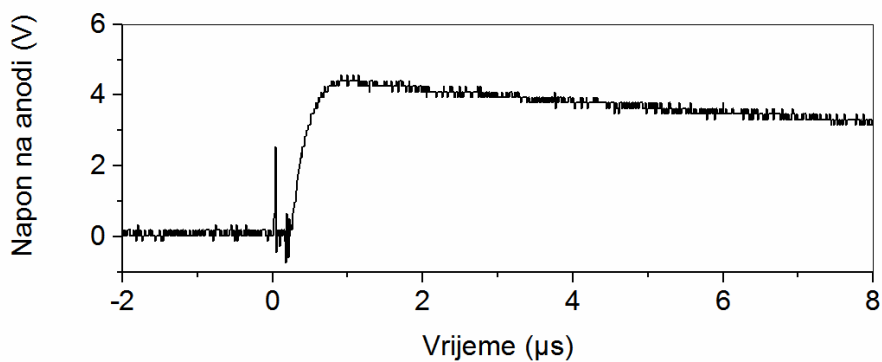


Slika 21. Shema PQAR sklopa bez vremena odgode

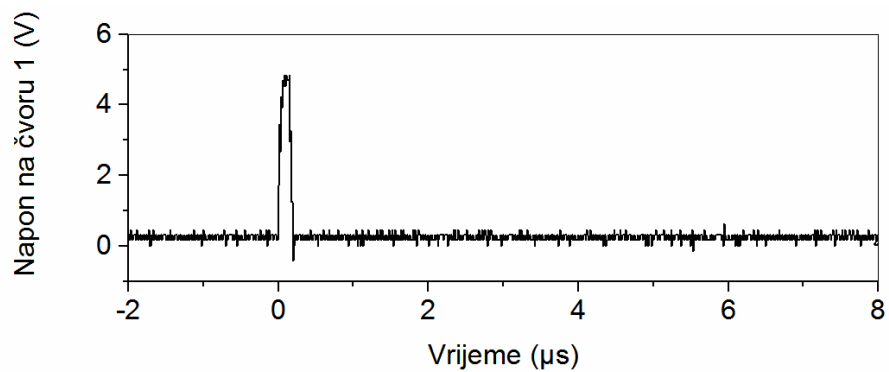
Na slici 22. može se vidjeti vremenski odziv ovog sklopa. Jasno se vidi da se napon na anodi resetira kada tranzistor provede. Međutim, nakon što tranzistor prestane voditi, napon na anodi opet poraste i ovog puta se resetira sporo, kao i u slučaju pasivnog resetiranja. To se dogodi zbog toga što se resetiranje dogodi prerano, prije nego što se lavinska multiplikacija potpuno zaustavi. Iz toga možemo zaključiti da je potrebno vrijeme odgode između zaustavljanja lavinske multiplikacije i resetiranja sklopa.



(a)



(b)

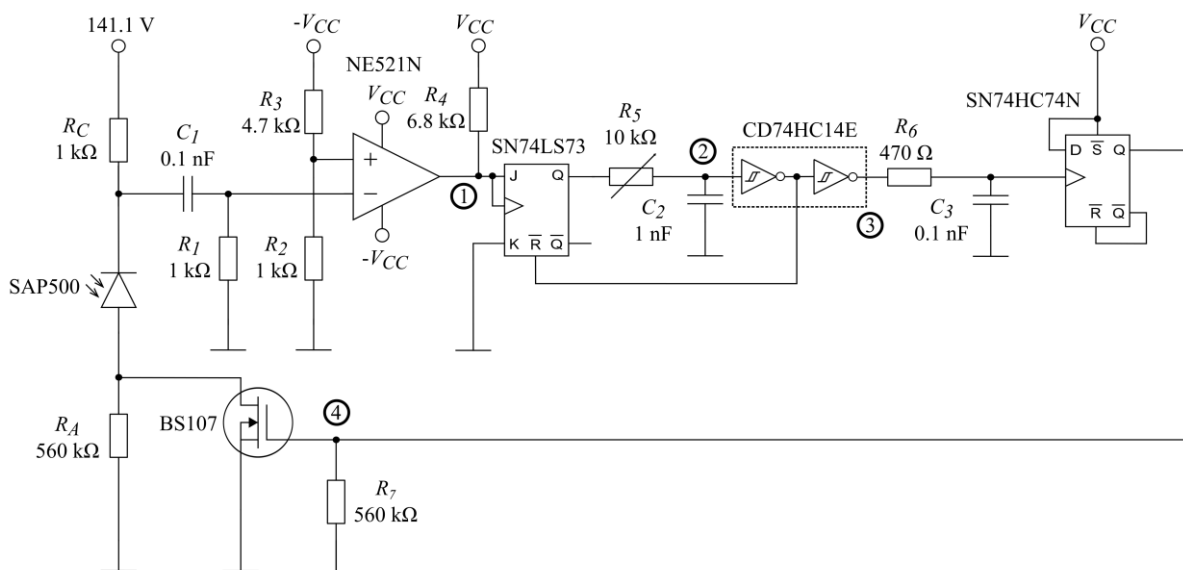


(c)

Slika 22. Vremenski odziv PQAR sklopa bez vremena odgode: a) Izmjenično vezani napon na katodi, b) Napon na anodi, c) Napon na izlazu komparatora (čvor 1)

4.3. Pasivni sklop s aktivnim resetom i podesivim vremenom odgode

U prethodnom poglavlju smo zaključili da PQAR sklop bez vremena odgode između gašenja lavinske multiplikacije i resetiranja sklopa ne radi dobro. Zbog toga je implementirano sklopovlje za generiranje impulsa sa podesivim vremenskim kašnjenjem između izlaza komparatora i upravljačke elektrode MOSFET-a. Svrha ovog sklopovlja je da stvori naponski impuls na upravljačkoj elektrodi sa određenim kašnjenjem, nakon što izlaz komaparatora prijeđe u visoku razinu. Shema cijelog sklopa je prikazana na slici 23.

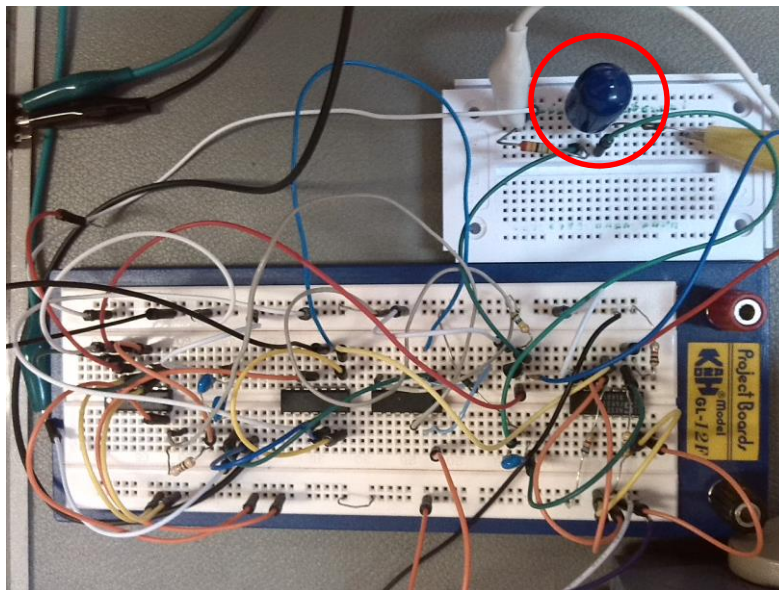


Slika 23. Shema PQAR sklopa s podesivim vremenom odgode, uključujući i sklopovlje za generiranje impulsa s podesivim kašnjenjem

Kao i u prethodnom sklopu, zbog pada napona na katodi uzrokovanog strujom lavinske multiplikacije, komparator provede, i njegov izlaz prijeđe u visoku razinu sve dok je napon izmjenično vezane katode ispod praga okidanja komparatora (NE521). Zbog toga provede J-K bistabil (74LS73) i njegov izlaz Q prijeđe u visoku razinu te nabija kapacitet C_2 s RC vremenskom konstantom koja je određena tim kapacitetom i otpornikom R_5 . Kada napon na kapacitetu dosegne prag okidanja invertirajućeg Schmittovog okidnog sklopa (74HC14), J-K bistabil se resetira asinkrono. Napon na čvoru 3 prijeđe u visoku razinu te dvostruki D bistabil (74HC74), koji služi za oblikovanje impulsa, na izlazu daje impuls trajanja 12 ns.

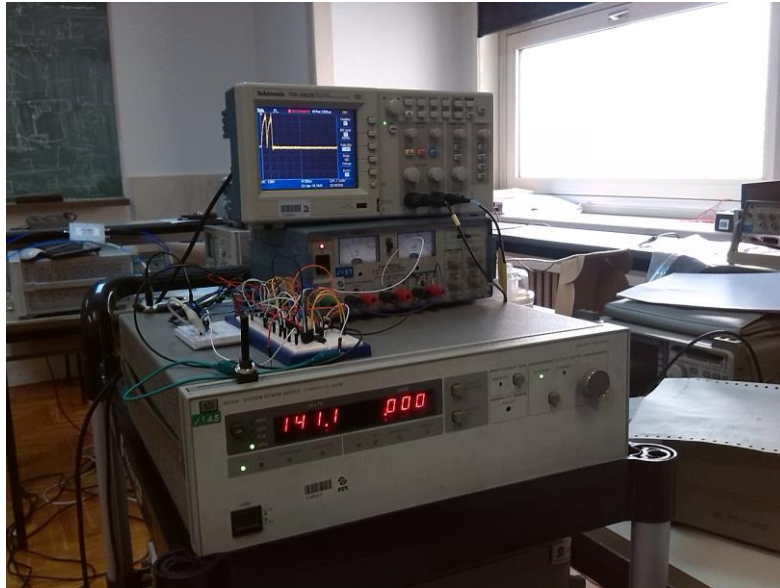
Njegov izlaz je spojen na upravljačku elektrodu MOSFET-a, te kada na tom čvoru dođe do pojave impulsa, tranzistor provede. RC član koji se sastoji od R_6 i C_3 služi za potiskivanje istitravanja koje se pojavljuje na čvoru 3 i osigurava ispravan rad dvostrukog D bistabila. Taj je bistabil potreban da generira kratak impuls na upravljačkoj elektrodi tranzistora, jer čvor 3 ostaje u visokoj razini sve dok se napon na kapacitetu C_2 ne smanji ispod razine okidanja Schmittovog invertirajućeg okidnog sklopa. Kako bi se povećala frekvencija detekcije upadnih nosioca, poželjno je da MOSFET vodi što je kraće moguće, u ovom slučaju 12 ns. Ako se promijeni otpornik R_5 , kapacitet C_5 se nabija različitom vremenskom konstantom, čime je na jednostavan način omogućeno mijenjanje kašnjenja naponskog impulsa, odnosno vremena odgode.

Opisani sklop realiziran je diskretnim komponentama na razvojnoj pločici. Izrađeni sklop prikazan je na slici 24. Crvenom je bojom zaokružena sama fotodioda, koja je oklopljena kako ne bi došlo do prodiranja svjetlosti.



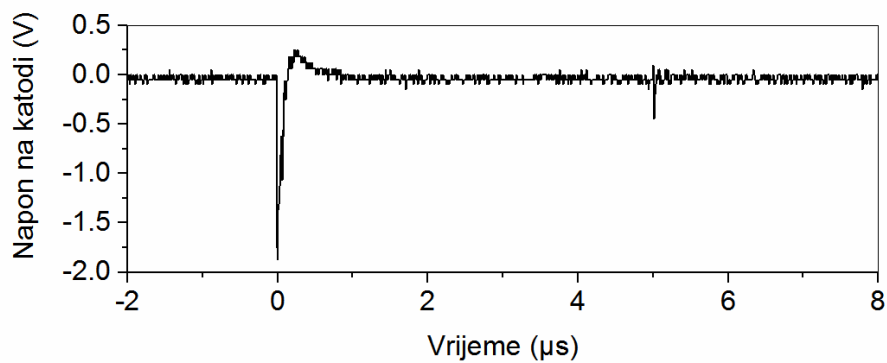
Slika 24. Razvojna pločica sa projektiranim sklopom

Cijeli mjerni postav, zajedno s korištenim izvorima napajanja i osciloskopom na kojem su promatrani rezultati mjerenja, prikazan je na slici 25.

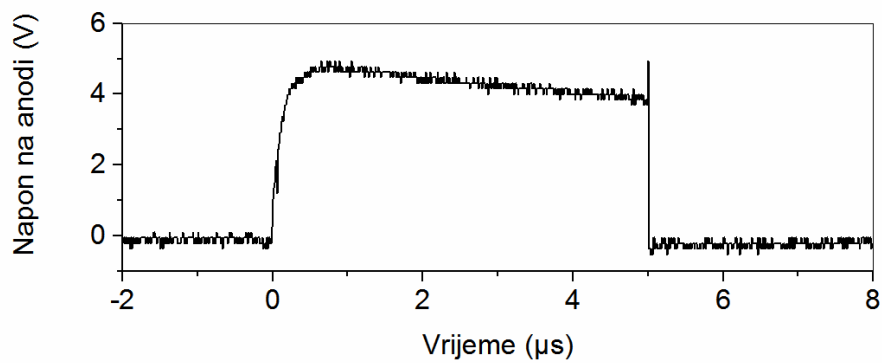


Slika 25. Mjerni postav za analizu sklopa

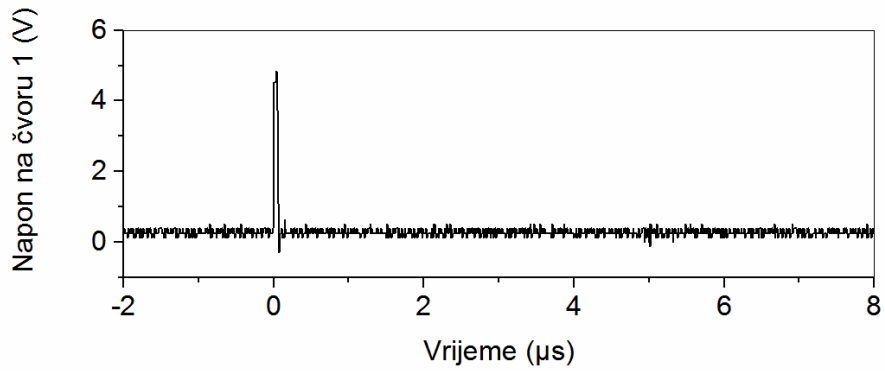
Naponski valni oblici u određenim čvorovima opisanog sklopa uz vrijeme odgode od otprilike $5 \mu\text{s}$ su prikazani na slici 26.



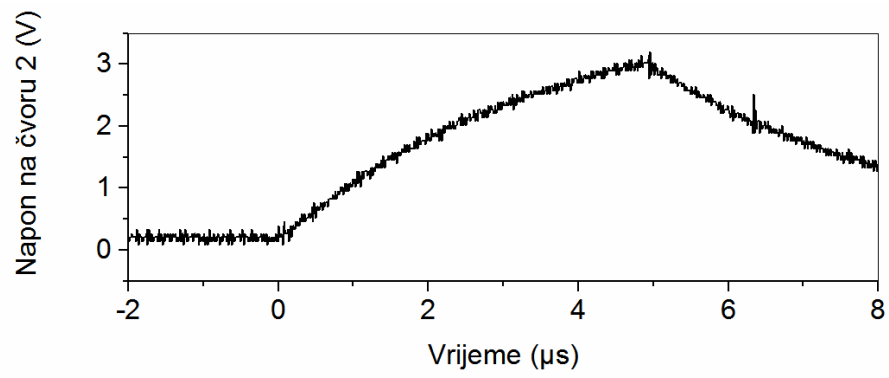
(a)



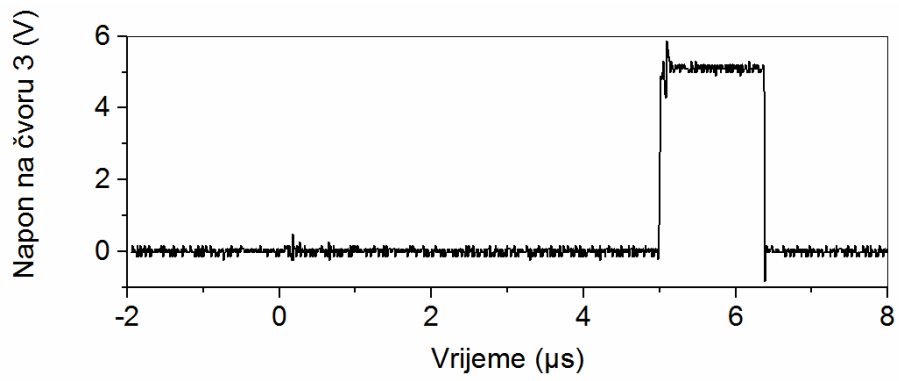
(b)



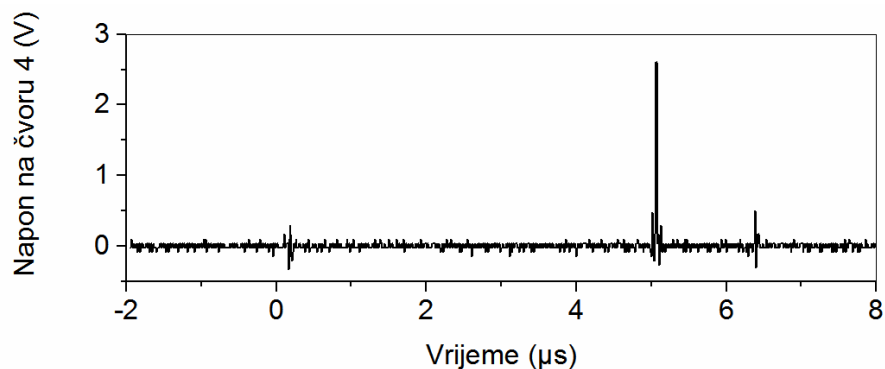
(c)



(d)



(e)

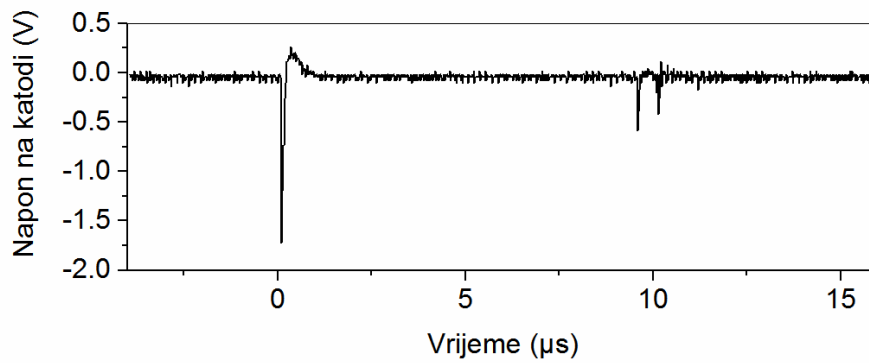


(f)

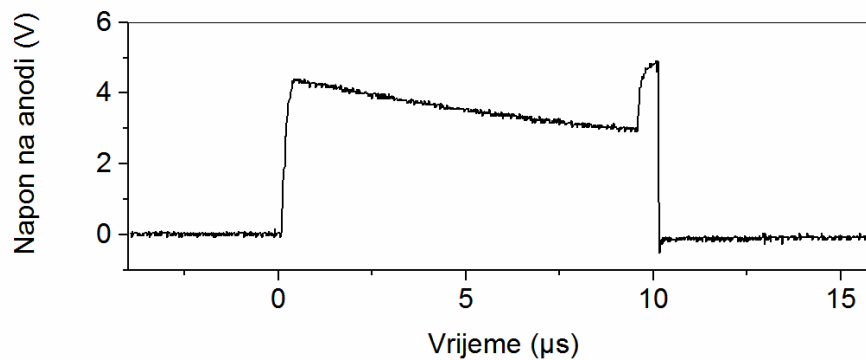
Slika 26. Vremenski odziv PQAR sklopa s vremenom odgode podešenim na 5 μs :
 a) katoda (izmjenična veza), b) anoda, c) izlaz komparatora (čvor 1), d)
 kondenzator C_2 (čvor 2), e) izlaz Schittovih okidnih sklopova (čvor 3), f)
 upravljačka elektroda MOSFET-a (čvor 4)

Na slici 27. su prikazani naponski valni oblici na anodi i katodi, uz najveći iznos otpornika R_5 , koji je 10 k Ω . Time je postignuto maksimalno vrijeme odgode, koje iznosi otprilike 10 μs . Očito je da za dulja vremena odgode postoji veća vjerojatnost da dođe do detekcije unutar tog vremena, odnosno prije resetiranja. Ako je to slučaj, nova lavinska multiplikacija se dogodi dok je napon diode ispod radnog napona, što znači da će struja uzrokovana tom lavinskom multiplikacijom biti znatno manja. To također znači da će pad napona na katodi biti manji, pa taj pad napona može biti nedovoljan da bi komparator proveo. Dakle, ako dođe do lavinske multiplikacije tijekom vremena odgode, ona se neće detektirati u sklopu. Primjer toga je prikazan na slici 27.

Struja uzrokovana lavinskom multiplikacijom zbog novog upadnog nosioca uzrokuje pad napona od 0.5 V na otporniku R_C , što je nedovoljno da komparator provede. Kao posljedica toga, ta se lavina ne može detektirati. Dioda se resetira 10 μs nakon prvog tamnog impulsa.



(a)

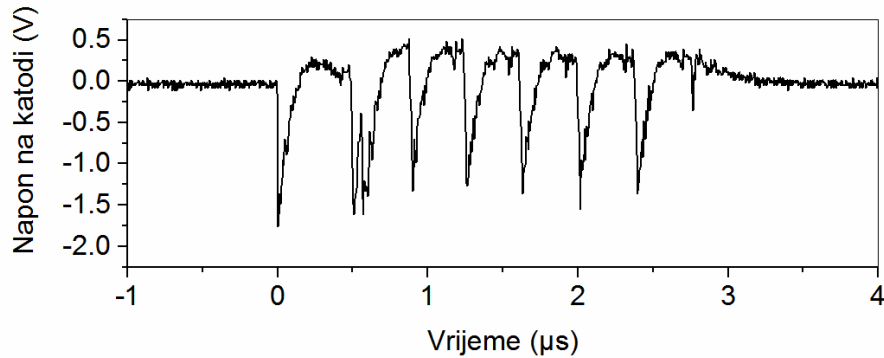


(b)

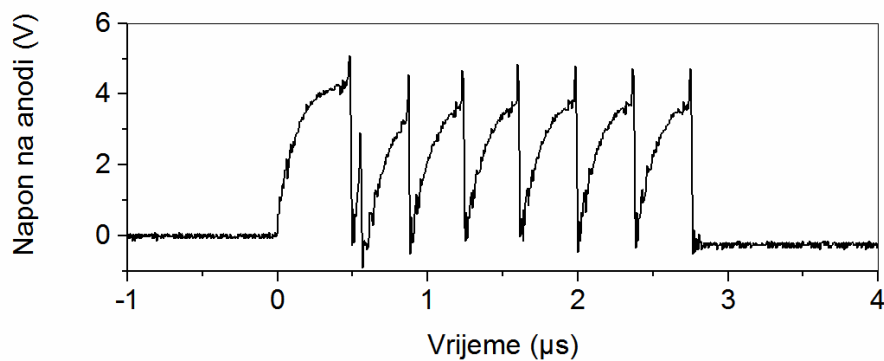
Slika 27. Primjer pojave lavinske multiplikacije tijekom vremena odgode kod PQAR sklopa s vremenom odgode od 10 μ s: a) napon na katodi (izmjenična veza), b) napon na anodi

Kako bi se dobila veća maksimalna frekvencija detektiranja, vrijeme odgode mora biti što je kraće moguće. Zbog intrinzičnih vremenskih kašnjenja komponenata koje su korištene, minimalno vrijeme odgode za ovaj sklop iznosi oko 300 ns. Međutim, za toliko kratka vremena odgode, naknadni impulsi mogu postati problem. Ti se naknadni impulsi dogode kada se nosioci, koji su bili zarobljeni u zamkama tijekom lavinske multiplikacije, otpuštaju i time uzrokuju dodatne, neželjene lavine [16]. To je moguće objašnjenje za valne oblike prikazane na slici 28. U nekim slučajevima, nova, neočekivana lavinska multiplikacija se dogodi odmah nakon resetiranja, što bi moglo biti uzrokovano otpuštanjem zarobljenih nosilaca. Taj je

efekt znatno izraženiji za kraća vremena odgode. Tako je za vrijeme odgode od 500 ns dobivena kaskada više lavinskih multiplikacija, što je prikazano na slici 28.



(a)

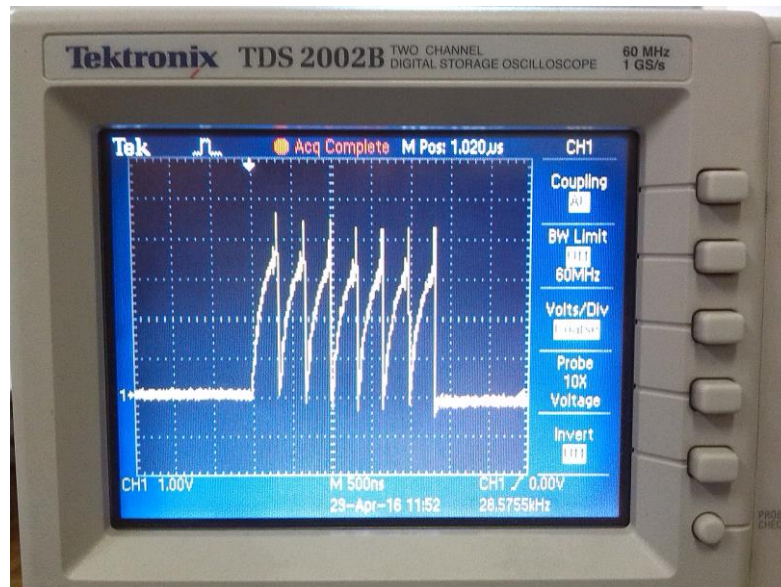


(b)

Slika 28. Primjer kaskade lavinskih multiplikacija kod PQAR sklopa s vremenom odgode od 500 ns: a) napon na katodi (izmjenična veza), b) napon na anodi.

Ovakva se pojava dogodi otprilike jednom u 20 mjerenja.

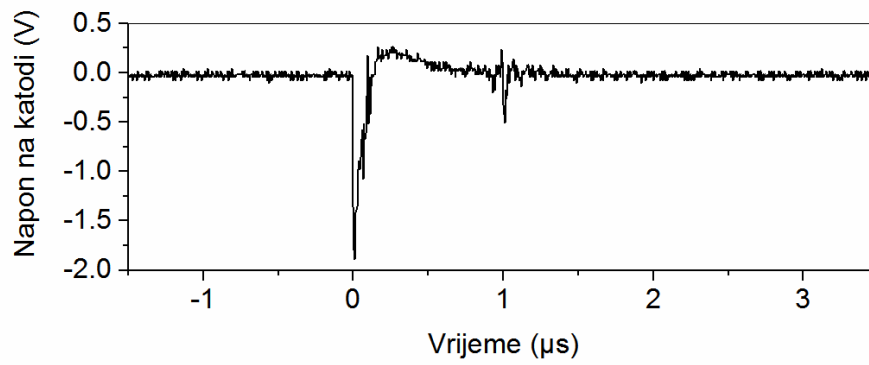
Primjer naknadnih impulsa za minimalno vrijeme odgode omogućeno ovim sklopom, oko 300 ns, prikazan na osciloskopu vidljiv je na slici 29.



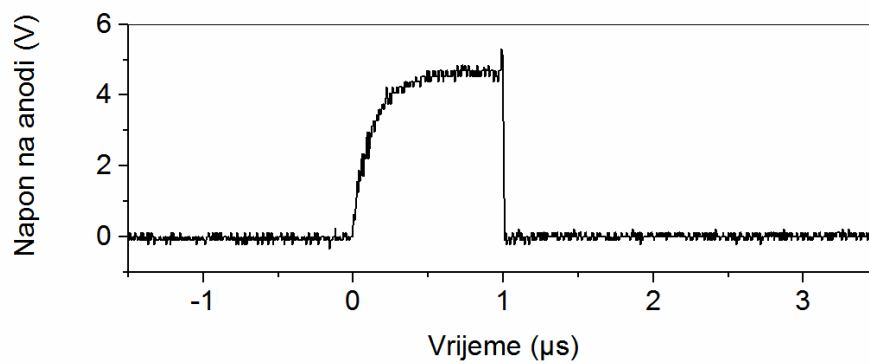
Slika 29. Prikaz kaskade lavinskih multiplikacija na osciloskopu

Vrijeme odgode moglo bi se dodatno skratiti smanjenjem prenapona V_{EX} , jer se na taj način smanjuje vjerojatnost pojave naknadnih impulsa. Međutim, manjim prenaponom se smanjuje i efikasnost detekcije, te stoga postoji kompromis između smanjenja vremena odgode i efikasnosti detekcije.

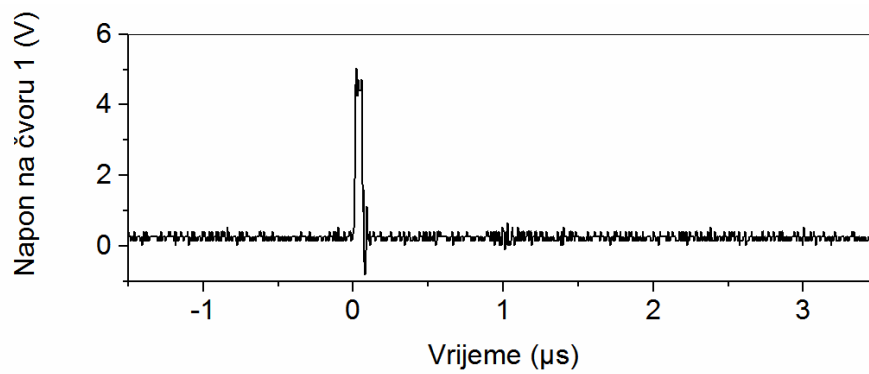
Uzevši u obzir sve gore navedene razloge, izabrano je vrijeme odgode u iznosu od $1 \mu\text{s}$ kao optimalno vrijeme odgode za ovu fotodiodu. To je vrijeme dovoljno dugo da vjerojatnost nastanka naknadnih impulsa bude zanemariva, a s druge strane, ne predugo, kako bi se minimizirao broj tamnih impulsa za vrijeme odgode te kako bi porasla maksimalna frekvencija detektiranja. Naravno, za različite diode ta optimalna vrijednost će se mijenjati, a ovaj sklop predstavlja jednostavno rješenje za podešavanje željenog vremena odgode. Naponski valni oblici za tu konačnu verziju sklopa prikazani su na slici 30.



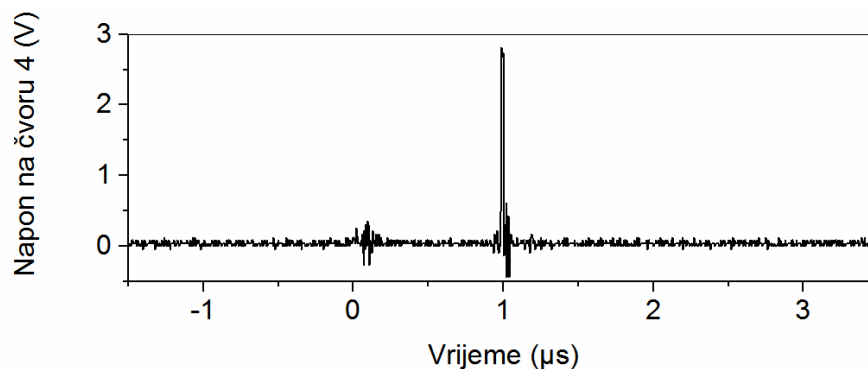
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 30. Vremenski odziv PQAR sklopa s optimalnim vremenom odgode od 1 μs :
 a) katoda (izmjenična veza), b) anoda, c) izlaz komparatora (čvor 1),
 d) upravljačka elektroda MOSFET-a (čvor 4)

Ako se usporedi ova izvedba sklopa gdje vrijeme odgode iznosi 1 μs s pasivnim sklopom u kojem su korišteni isti otpornici u seriji sa diodom, može se primijetiti glavna prednost aktivnog resetiranja u odnosu na pasivno. Vrijeme pasivnog resetiranja iznosi oko 30 μs , dok je dioda s aktivnim resetiranjem potpuno resetirana na radni napon u vremenu od 1 μs . To znači da je maksimalna frekvencija detektiranja pasivnog sklopa s aktivnim resetiranjem gotovo trideset puta veća od frekvencije pasivnog sklopa s pasivnim resetiranjem, što je znatno poboljšanje. Problemi kod sklopa s aktivnim resetiranjem, kao što su veća vjerojatnost naknadnih impulsa, moguće detekcije za vrijeme vremena odgode ili dok je MOSFET u vođenju, mogu se izbjeći odabirom odgovarajućeg vremena odgode te vrlo kratkim vremenom vođenja tranzistora. To se postiže time što na upravljačku elektrodu stižu kratki impulsi sa izlaza dvostrukog D bistabila.

5. Zaključak

Cilj ovog rada bio je analizirati utjecaj vremena odgode na rad pasivnog sklopa s aktivnim resetiranjem za fotodiode s lavinskom multiplikacijom za detekciju jednog fotona. Ponašanje tih fotodioda je prvo je promatrano tijekom rada unutar pasivnog sklopa za potiskivanje proboja. Zatim je, promatrajući inicijalni pasivni sklop s aktivnim resetiranjem, bez vremena odgode, kod kojeg resetiranje započinje dok se lavinska multiplikacija nije u potpunosti zaustavila, pokazan razlog za uvođenjem vremena odgode. Projektiran je pasivni sklop s aktivnim resetiranjem i podesivim vremenom odgode kako bi se optimizirao rad sklopa za različite diode. Na kraju je promatran utjecaj različitih vremena odgode na rad sklopova za potiskivanje proboja te se pokazalo da se kraćim vremenom odgode dobiva veća maksimalna frekvencija detektiranja, no da to vrijeme mora biti dovoljno dugo da se izbjegnu dodatne lažne detekcije. Također su objašnjene prednosti aktivnog resetiranja u odnosu na pasivno, prije svega kraće vrijeme resetiranja.

6. Zahvala

Zahvaljujemo mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Suligoju na vodstvu i savjetima tijekom izrade rada. Također zahvaljujemo asistentu Tihomiru Kneževiću, dipl. ing., na pruženoj pomoći u radu s mjernim instrumentima i objašnjenjima fizikalnih pojava u fotodiodama.

7. Literatura

- [1] H. Dautet et al., "Photon-counting techniques with silicon avalanche photodiodes," *Applied Optics*, sv. 35, str. 3894-3900, 1993.
- [2] J. Zhang, M. A. Itzler, H. Zbinden, J. W. Pan, "Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication," *Light: Science & Applications* 4, e286, 2015.
- [3] D. Grubišić, A. Shah, "New silicon reach-through avalanche photodiodes with enhanced sensitivity in the DUV/UV wavelength range," 36. Međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju, elektroniku i mikroelektroniku (MIPRO), str. 48-54, 2013.
- [4] S. Cova, A. Lacaita and G. Ripamonti, "Trapping phenomena in avalanche photodiodes on nanosecond scale," *IEEE Electron Device Letters*, sv. 12, br. 12, str. 685-687, 1991.
- [5] M. Stipčević, D. Q. Wang, R. Ursin, "Characterization of a commercially available large area, high detection efficiency single-photon avalanche diode," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, sv. 31, br. 23, str. 3591-3596, 2013.
- [6] A. Gallivanoni, I. Rech, M. Ghioni, "Progress in quenching circuits for single photon avalanche diodes," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, sv. 57, br. 6, str. 3815-3826, 2010.
- [7] M. Stipčević, H. Skenderović, D. Gracin, "Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range," *Optics Express*, sv. 18, br. 16, 2010.
- [8] B. F. Aull et al., "Geiger-Mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging," *Lincoln Laboratory Journal*, sv. 13, br. 2, str. 335-350, 2002.
- [9] S. Tisa, A. Tosi, and F. Zappa, "Fully-integrated CMOS single photon counter," *Optics Express*, sv. 15, str. 2873-2887, 2007.

- [10] S. Cova, M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori, F. Zappa, "Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection," *Applied Optics*, sv. 35, br. 12, str. 1956-1976, 1996.
- [11] S. Tisa, F. Guerrieri, F. Zappa, "Variable-load quenching circuit for single-photon avalanche diodes," *Optics Express*, sv. 16, br. 3, str. 2232–2244, 2008.
- [12] M. Liu, C. Hu, J. C. Campbell, Z. Pan, M. M. Tashima, "A novel quenching circuit to reduce afterpulsing of single photon avalanche diodes," *Proc. SPIE*, sv. 6900, str. 5, 2008.
- [13] D. Bronzi et al., "Fast sensing and quenching of CMOS SPADs for minimal afterpulsing effects," *IEEE Photonics Technology Letters*, sv. 25, br. 8, str. 776-779, 2013.
- [14] A. Restelli, I. Rech, P. Maccagnani, M. Ghioni, S. Cova, "Monolithic silicon matrix detector with 50 μm photon counting pixels," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, sv. 44, br. 5, str. 430-434, 2008.
- [15] Laser Components DG, Inc. Pulsed Laser Diodes - Avalanche Photodiodes Catalog, dostupno na:
http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc/kataloge/pld-apd.pdf
- [16] M. G. Liu, C. Hu, J. C. Campbell, Z. Pan, M. M. Tashima, "Reduce afterpulsing of single photon avalanche diodes using passive quenching with active reset," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, sv. 44, br. 5, str. 430-434, 2008.

8. Sažetak

Fotodiode s lavinskom multiplikacijom za detekciju jednog fotona (engl. *Single-photon avalanche diode*, SPAD) postaju sve popularnije u primjenama gdje je bitno detektirati svjetlost malog intenziteta. One se koriste u tzv. Geigerovom režimu rada, gdje se samoodržavajuća lavina treba prekinuti, zato je bitan dio sklopovlja za detekciju sklop za potiskivanje proboja (engl. *Quenching circuit*). Prvo će se proučavati jednostavan pasivni sklop za potiskivanje proboja koji se sastoji od SPAD-a i dva serijska otpornika te će se izmjeriti frekvencija tamnih impulsa (engl. *Dark count rate*, DCR) SPAD-a. Nakon toga će se implementirati pasivni sklop za potiskivanje proboja s aktivnim resetom (engl. *Passive quenching active reset*, PQAR). Vidjet će se da bez dovoljno velikog vremena odgode (engl. *Hold-off time*) između potiskivanja i reseta sklop ne radi ispravno. Zbog toga će se dodati sklopovlje za vremensko kašnjenje pomoću kojeg će se mijenjati vrijeme odgode. Rad PQAR sklopa s podesivim vremenom odgode proučen je uz korištenje različitih fotodioda, te je za svaku od njih određeno minimalno vrijeme odgode za koju sklop i dalje dobro radi. Na kraju je dana usporedba pasivnog sklopa s pasivnim resetom i pasivnog sklopa s aktivnim resetom, uz naglasak na prednosti aktivnog u odnosu na pasivni reset.

9. Summary

Single-photon avalanche diodes (SPADs) are gaining popularity in applications where low intensity light needs to be detected. Since they are used in Geiger mode, where self-sustaining avalanche needs to be quenched, an important part of the detection circuitry is the quenching circuit. First, we examine the operation of a basic passive quenching circuit consisting of the SPAD and two series resistors and measure the SPAD's dark count rate. Then we implement a passive quenching circuit with active reset (PQAR). Without a sufficiently long hold-off time between quenching and reset the circuit does not operate properly. Because of that, a hold-off time is introduced by means of an adjustable time delay circuit. The behavior of the PQAR circuit for different hold-off times is then examined, and the minimum hold-off time of 1 μ s, which still allows for correct operation with the given circuitry is determined. Finally, a comparison is made between the passive and PQAR circuit, focusing on the advantages of active over passive reset.