

UTICAJ JONIZUJUĆEG ZRAČENJA NA KARAKTERISTIKE LINEARNIH STABILIZATORA NAPONA

Vladimir Vukić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Sadržaj: U radu su predstavljeni rezultati ispitivanja radijacione otpornosti stabilizatora napona sa niskim padom napona kod kojih su primenjena tri različita tehnološka postupka za sintezu serijskog tranzistora. Ispitivane su konfiguracije sa vertikalnim npn tranzistorom, lateralnim pnp i vertikalnim pnp tranzistorom. Izložene su teorijske osnove konstrukcije bipolarnih tranzistora i interakcije jonizujućeg zračenja sa poluprovodnim i izolacionim materijalom u integrisanim kolima. Predstavljeni su rezultati ispitivanja pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona u funkciji apsorbovane doze γ zračenja.

Ključne reči: bipolarni tranzistor, stabilizator napona, jonizujuće zračenje, površinska rekombinacija, zahvat naelektrisanja, koeficijent strujnog pojačanja.

1. UVOD

Upotreba elektronskih komponenata u satelitskim, vojnim i reaktorskim sistemima, pored standardnih metoda izbora komponenata, vezanih za namenu i termičke karakteristike integrisanih kola, nameću i analizu otpornosti komponenata na uticaj radioaktivnog zračenja. Takođe, povećanje stepena integracije elektronskih komponenata nameće potrebu obezbeđivanja napajanja električnom energijom na vrlo niskim naponima, sa veoma malim tolerancijama promene napona napajanja i u uslovima pojave nanosekundnih tranzijenata, kao i rad sa malom disipacijom. Ovako strogi zahtevi u najvećem broju slučajeva isključuju mogućnost korišćenja starijih integrisanih stabilizatora napona sa serijskim npn Darlington-tranzistorom, i kao rešenje nameću upotrebu stabilizatora sa niskim padom napona (eng. Low Dropout Voltage Regulator) ili prekidačkih ("svičerskih") napajanja. U tehničkoj primeni su posebno značajne komercijalne komponente, koji se godinama proizvode u velikom broju osnovnih modela i njihovih varijanti, prvenstveno zbog znatno niže cene i veće dostupnosti od integrisanih kola koja se namenski prave za rad u posebnim uslovima eksploatacije. Potrebu za radijaciono otpornim integrisanim kolima u satelitskoj i vazduhoplovnoj tehnici opravdava podatak da je od 1971. do 2000. godine širom sveta na satelitima, avionima i balističkim raketama registrovano oko 4500 incidenata, za koje je utvrđeno da su posledica delovanja radioaktivnog zračenja na integrisana kola upravljačkih elektronskih sklopova [1]. Pored komercijalnih komponenata, postoje i radijaciono ojačane, namenski pravljenе za eksploataciju u radijacionom okruženju, kod kojih se promenom dizajna komponenata, geometrijom tranzistora, postupkom izolovanja, kao i načinom dopiranja postiže visoka otpornost na uticaj radioaktivnog zračenja. Od udela od 70 %, koliki su vojne, radijaciono ojačane elektronske komponente imale tokom šezdesetih godina prošlog veka u ukupnoj svetskoj proizvodnji, do 2000. godine je udeo ovakvih komponenata na tržištu opao na 0,5% [1]. U svetu je 1990. godine postojalo dvadeset proizvođača radijaciono ojačanih

elektronskih komponenata, dok su se 2000. godine samo četiri kompanije bavile njihovom proizvodnjom [1]. Zbog toga je danas cena radijaciono ojačanih komponenata ekstremno visoka (nekoliko stotina puta veća od cene odgovarajućih komercijalnih komponenata). Sa druge strane, zbog specifičnosti zahteva i brzog tehnološkog razvoja industrije poluprovodnika, često radijaciono ojačane komponente imaju znatno lošije karakteristike od sličnih komercijalnih. Ako se uzmu u obzir i politička ograničenja u prometu ovakvih integrisanih kola, postaje jasno da je za konstruisanje elektronskih sistema koji treba da rade u teškim uslovima eksploatacije, kakvi su gotovo svi elektronski sistemi nuklearne tehnike, neophodno pronalaženje odgovarajućih rešenja upotrebom komercijalnih integrisanih kola, koja nisu eksplicitno namenjena izlaganju uticaju radioaktivnog zračenja.

Predmet ovog rada je ispitivanje mogućnosti primene komercijalnih stabilizatora napona sa niskim padom napona u ekstremnim uslovima eksploatacije, pre svega u radijacionom okruženju. Ispitivan je uticaj γ zračenja na pad napona kolektor - emitor (V_{CE}) na serijskim tranzistorima stabilizatora napona različitih geometrija i konstrukcija: vertikalnom npn tranzistoru (kolo LT1086CT5) [2], lateralnom pnp tranzistoru (LM2940CT5) [3] i vertikalnom pnp tranzistoru (L4940V5) [4].

2. TEORIJA

2.1. Bipolarni tranzistor

Bipolarni tranzistor predstavlja osnovnu komponentu široke familije linearnih integrisanih kola, poput operacionih pojačavača, stabilizatora napona, komparatora, naponskih referenci, ali i drugih vrsta integrisanih kola, poput A/D i D/A konvertora, multipleksera, PWM i PLL kola. Karakteristike bipolarnog tranzistora su definisane njegovom konstrukcijom, odnosno izborom geometrije i dopiranja, kao i vrstom polarizacije.

Tehnološki faktori tranzistora određuju raspodelu slobodnih nosilaca naelektrisanja u tranzistoru, utičući na njegove strujne i naponske karakteristike. Ako se tranzistor polariše, većinski nosioci prolaze direktno kroz polarisan emitorski spoj. Šupljine prelaze u emitor, a elektroni u bazu. Time se na ivici oblasti prostornog naelektrisanja na emitorskom spoju stvara koncentracija manjinskih nosilaca [5]:

$$n_p(0) = n_{p0} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (1)$$

gde je $V_T = \frac{kT}{q}$ - temperaturni napon (oko 26 mV na sobnoj temperaturi), q - naelektrisanje elektrona, k - Bolcmanova konstanta. Relacija važi pod pretpostavkom da je nivo ubačenih manjinskih nosilaca nizak, odnosno da je koncentracija manjinskih nosilaca u bazi uvek manja od koncentracije većinskih nosilaca. Zbog inverzne polarizacije kolektorskog spoja, koncentracije manjinskih nosilaca sa obe strane kolektorske oblasti prostornog naelektrisanja su jednake nuli. Zanimarivanjem inverzne struje zasićenja, koju čine elektroni i šupljine koji driftuju na granici između baze i kolektora, kolektorska struja se svodi na struju elektrona koji dolaze iz emitora i prolaze kroz bazu. Pošto je baza tranzistora sredina visoke provodnosti, njeno električno polje je male jačine, pa je gustina struje elektrona kroz područje baze određena samo njihovom difuzionom komponentom [5]:

$$J_{\text{ndif}} = qD_n \frac{dn_p(x)}{dx} = qD_n \frac{n_p(0)}{W} = J_C \quad (2)$$

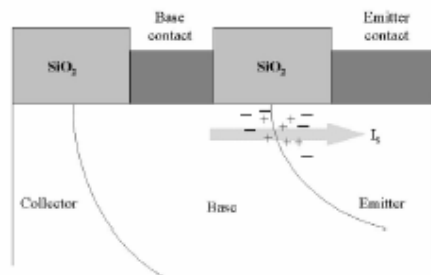
Iz relacija za koncentraciju elektrona na emitorskom spoju [5] i prethodne jednačine dobija se zavisnost kolektorske struje od napona baza - emitor u tranzistoru:

$$i_C = AJ_C = A \frac{qD_n n_{p0}}{W} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) = A \frac{qD_n n_i^2}{N_A W} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (3)$$

odnosno:

$$i_C = I_S \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (4)$$

gde je A - površina poprečnog preseka emitorskog spoja, N_A - koncentracija nečistoća (akceptora) u bazi, D_n - difuziona konstanta elektrona, I_S - struja površinske rekombinacije, koja protiče na granici Si/SiO₂ na spoju baza - emitor [5].



Slika 1. Struja površinske rekombinacije na spoju baza - emitor [6]

Poželjno je da na kolektorsku struju utiče samo napon baza - emitor, kako bi samo promenom ovog napona upravljalo tranzistorom, nezavisno od napona baza - kolektor. Napon V_{BC} u bazi određuje širinu oblasti prostornog naelektrisanja na kolektorskom spoju, odnosno efektivnu širinu baze, W . Sa povećanjem napona baza - kolektor sužava se baza i povećava se struja kolektora. Pomenuta pojava se zove Erlijev efekat, i karakteriše se Erlijevim naponom, V_A , prema izrazu [7]:

$$i_C = I_{S0} \left(1 + \frac{V_{CB}}{V_A}\right) \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (5)$$

gde je I_{S0} - struja površinske rekombinacije pri nultoj polarizaciji kolektorskog spoja.

Uticao kolektorske struje na širinu baze opisuje Kirkov efekat [7]. Ukoliko dođe do porasta struje kolektora do vrlo visoke vrednosti, koncentracija manjinskih nosilaca može da postane po redu veličine jednaka koncentraciji primesa u oblasti prostornog naelektrisanja spoja baza - kolektor. Posledica ujednačavanja ovih koncentracija je povećanje širine baze, što dovodi do smanjenja strujnog pojačanja i granične frekvencije tranzistora prilikom proticanja velikih struja.

Struju baze formiraju tri komponente: struja šupljina, I_{PE} , struja rekombinacije, I_{RB} , i inverzna struja zasićenja kolektorskog spoja, I_{CB0} . Ako se zanemari inverzna struja zasićenja kolektorskog spoja, preostaju struja rekombinacije i struja šupljina, koje odlaze iz baze kroz direktno polarisan emitorski spoj npn tranzistora. Sabiranjem izraza za rekombinacionu struju baze i struju šupljina dobija se struja baze, ili u opštem slučaju ulazna karakteristika bipolarnog tranzistora [5]:

$$i_B = I_{PE} + I_{RB} = \left(\frac{1}{2} \frac{n_i^2 W q A}{N_A \tau_b} + \frac{q D_p A n_i^2}{N_D L_p} \right) \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \quad (6)$$

Iz izraza za struje baze i emitora dobija se relacija za koeficijent strujnog pojačanja tranzistora u funkciji konstrukcionih parametara [5]:

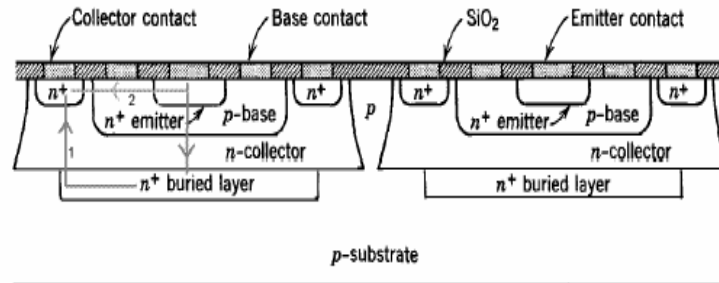
$$\beta = \frac{i_C}{i_B} = \frac{\frac{D_n}{N_A W}}{\frac{1}{2} \frac{W}{N_A \tau_B} + \frac{D_p}{N_D L_p}} = \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_B} + \frac{D_p N_A W}{D_n N_D L_p}} \quad (7)$$

Iz relacije za strujno pojačanje se uočava da je β veće ako je širina baze W mnogo manja od difuzionih dužina i ako je emitor mnogo jače dopiran od baze. Za iste uslove (temperatura, dimenzije, dopiranost, podloga) npn tranzistor ima manje strujno pojačanje od pnp tranzistora, zbog veće vrednosti difuzione konstante D_n u odnosu na D_p .

2.2. Konstrukcija bipolarnih tranzistora

Tehnološko rešenje primenjeno pri konstrukciji tranzistora presudno utiče na njegove karakteristike, naročito prilikom izlaganja dejstvu spoljašnjih uticaja. Geometrija tranzistora, dopiranost oblasti, širina baze, kvalitet oksida su neke od karakteristika kojima treba posvetiti veliku pažnju prilikom konstruisanja integrisanog kola od koga se očekuje upotreba u uslovima izlaganja radioaktivnom zračenju ili ekstremnim temperaturama. U integrisanim kolima dominiraju npn tranzistori, zbog znatno boljih karakteristika u odnosu na pnp tranzistore. Osnovne prednosti npn tranzistora su veće strujno pojačanje i viša radna frekvencija, što je posledica veće pokretljivosti elektrona u odnosu na šupljine. Pored toga, i tehnološki postupak izrade npn tranzistora je, po pravilu, jednostavniji od procesa izrade pnp tranzistora [5].

Pored izbora odgovarajuće geometrije tranzistora, na karakteristike značajno utiče i vrsta dopiranja. Zahtev u projektovanju je veliko strujno pojačanje, što se postiže jakim dopiranjem emitora. Pored toga, da bi se izbegla pojava izražene zavisnosti širine baze od napona baza - kolektor, trebalo bi da kolektor bude slabo dopiran. U ovom slučaju veći deo struje bi se zatvarao lateralno (putanja 2 na slici 2), čime bi se drastično povećala otpornost kolektora. Da bi se izbeglo povećanje otpornosti kolektora, a samim tim i povećanje napona zasićenja tranzistora, kolektor bi trebalo da bude jako dopiran. Rešenje za ove protivrečne zahteve je uvođenje slabije dopiranog epitaksijalnog sloja na spoju baza - kolektor. Na ovaj način se dobija stabilna širina baze, pošto se oblast prostornog naelektrisanja širi ka epitaksijalnom sloju kolektora, a i otpornost kolektora je niska, zbog visoke dopiranosti supstrata, kolektorskog sloja iza epitaksijalnog. Ugradnja epitaksijalnog sloja omogućava rad na visokim frekvencama, sa visokim naponom i niskim naponom zasićenja.



Slika 2. Struktura epitaksijalnih npn tranzistora u integrisanom kolu: 1 - glavni tok struje, 2 - parazitni tok struje [6]

I pored lošijih karakteristika u odnosu na npn tranzistore, kod većine integrisanih kola, a pre svih stabilizatora napona sa niskim padom napona, neophodna je i sinteza pnp tranzistora. Zahtevi koji se postavljaju prilikom konstrukcije pnp tranzistora su omogućavanje formiranja ovih tranzistora na istom supstratu sa npn tranzistorima, kao i mogućnost komplementarne realizacije pnp i npn tranzistora radi omogućavanja istovremene ugradnje oba tranzistora. Najjednostavnija tehnološka realizacija je formiranje lateralnog pnp tranzistora. Ipak, i pored jednostavnosti tehnološkog procesa, primena lateralnog pnp tranzistora je rešenje sa mnogo nedostataka. Lateralni pnp tranzistor ima malo strujno pojačanje ($\beta = 5 - 10$), vezano za nisku dopiranost emitora u odnosu na bazu, kao i nisku radnu frekvenciju (f_T), što je posledica velike širine baze. Takođe, deo šupljina koje su iz emitora došle u bazu izaziva dalje smanjenje strujnog pojačanja. Savremenije tehnološko rešenje je vertikalni pnp tranzistor. Osnovne prednosti su postizanje manjeg pada napona na serijskom tranzistoru, manje struje curenja kolektor - emitor i veće stabilnosti tokom rada [9].

2.3. Uticaj jonizujućeg zračenja na karakteristike bipolarnih tranzistora

Osnovne manifestacije dejstva jonizujućeg zračenja na integrisana kola su povećanje provodnosti (u poluprovodniku se ostvaruje generisanjem parova elektron - šupljina), zahvat naelektrisanja u izolatorima, nastanak električnih i magnetnih polja i ispoljavanje hemijskih efekata. Energija kreiranja jednog para elektron - šupljina u silicijumu je oko 3,6 eV, dok je energija energetskeg procepa 1,1 eV. Specifična jonizaciona gustina, odnosno broj parova elektron - šupljina nastalih prilikom apsorbovanja doze jonizujućeg zračenja u materijalu od 1 rad^1 , konstantna je i nezavisna od temperature, i u silicijumu iznosi $4,05 \cdot 10^{13}$ parova elektron - šupljina po cm^3 materijala ($\text{hep}/\text{cm}^3(\text{Si})$) [8].

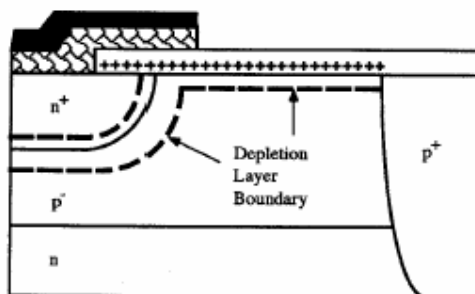
Neki elektroni iz parova elektron - šupljina mogu da napuste površinu materijala zbog čega materijal postaje pozitivno naelektrisan, zbog većinskog prisustva pozitivnih jona. Ako pomenuti elektroni budu zahvaćeni u susednom materijalu, on postaje električno negativan, zbog čega na graničnoj površi između dva materijala dolazi do pojavljivanja električnog polja, odnosno uspostavljanja struje.

¹ Rad je jedinica za apsorbovanu dozu zračenja, i definiše se na sledeći način: $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$ određenog materijala. SI jedinica za apsorbovanu dozu zračenja je grej [Gy], i predstavlja energiju od 1J apsorbovanu u 1 kg materijala: $1 \text{ Gy} = 1\text{J}/1\text{kg}$. U radovima vezanim za radijacionu otpornost apsorbovana doza se i dalje najčešće izražava u radima ($1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy} = 1 \text{ cGy}$).

U izolacionim materijalima, nosioci naelektrisanja nastali pod uticajem jonizujućeg zračenja, prvenstveno raskidanjem veza kristalne rešetke (npr. Si - O₂), formiraju struju pod uticajem internog električnog polja, što se odražava na rast provodnosti izolatora. Nosioci naelektrisanja u izolatoru ostaju zarobljeni u kompleksnim defektima, što može da dovede do trajne degradacije električnih karakteristika dielektrika, čak i ako pokazuju električnu neutralnost. Kompleksni defekti predstavljaju zahvaćena energetska stanja u energetskom procepu materijala. Na diskontinuitetima kristalne rešetke, odnosno graničnim površima materijala, zahvaćena energetska stanja formiraju površinska energetska stanja. Ova površinska stanja predstavljaju rekombinacione centre, i predstavljaju osnovni mehanizam rekombinacije u materijalu izloženom dejstvu jonizujućeg zračenja - mehanizam površinske rekombinacije [8]. Kada se silicijum ozrači fotonima, dolazi do porasta brzine površinske rekombinacije i gustine površinskih stanja. Nivo rekombinacije, U, povećava se na površini materijala, zbog povećanja broja površinskih stanja nastalih usled dejstva jonizujućeg zračenja. Zbog smanjenja broja nosilaca naelektrisanja na površini, počinje difuzija nosilaca naelektrisanja iz dubine materijala ka površini, prema gradijentu koncentracije.

2.3.1. Zahvat naelektrisanja i brzina površinske rekombinacije

Pri dejstvu jonizujućeg zračenja na izolator, dolazi do zahvata naelektrisanja nastalog u materijalu usled jonizacije. Ova naelektrisanja i njima suprotna po znaku u poluprovodniku koji se graniči sa oksidom utiču na stvaranje električnog polja. Kako se jačina električnog polja povećava sa stvaranjem ovih naelektrisanja, sa povećanjem provodnosti može da dođe do proticanja struje ka površini dielektrika, čime bi se uspostavio ravnotežni tok struje u materijalu. Međutim, ako porast provodnosti nije dovoljan i električno polje nastavi da raste, može da dođe do električnog proboja, i naelektrisanje se vraća na površinu [10].



Slika 3. Zahvat pozitivnih naelektrisanja u oksidu (depletion layer boundary - granica oblasti prostornog naelektrisanja) [6]

Provodnost izolatora može buda toliko mala da zahvaćeni elektroni i šupljine danima nakon ozračivanja ne mogu da se rekombinuju sa nosiocima suprotnog naelektrisanja, koji su takođe zahvaćeni u materijalu. I karakteristike materijala mogu da se promene, iako izolator u celini ostaje električno neutralan [8].

U bipolarnim tranzistorima, zahvaćena naelektrisanja i njihovi površinski slojevi stvaraju slojeve inverznih naelektrisanja. Posledica formiranja inverznih slojeva je povećanje generaciono - rekombinacionih struja površinskih stanja, koje smanjuju vreme života manjinskih nosilaca, a time i strujno pojačanje tranzistora β .

Sklonost bipolarnih integrisanih kola ka formiranju naelektrisanja pod uticajem jonizujućeg zračenja direktno zavisi od kvaliteta oksida, odnosno od njegovog faktora dielektričnih gubitaka ($\text{tg}\delta$). Kod bipolarnih tranzistora, smanjenje strujnog pojačanja i povećanje struje curenja su dva najvažnija parametra na koje utiču jonizujuće i neutronske zračenje. Osnovni mehanizmi koji utiču na pomenute mikroskopske parametre su zahvat pozitivnih naelektrisanja u oksidu u blizini graničnih slojeva sa silicijumom, stvaranje sloja negativnih naelektrisanja na spoju Si/SiO₂ i nastanak površinskih defekata na ovim spojevima. Kod bipolarnih tranzistora je koncentracija površinskog dopiranja do hiljadu puta veća u odnosu na MOSFET tranzistore, pa su zato bipolarni tranzistori znatno otporniji na dejstvo jonizujućeg zračenja [8].

Dominantan uticaj jonizujućeg zračenja na koeficijent strujnog pojačanja β kod bipolarnih tranzistora ostvaruje se preko mehanizma površinske rekombinacije. Za razliku od teških čestica (neutroni, protoni, joni), koji dominantan uticaj na integrisano kolo ostvaruju u dubini supstrata, fotoni jonizujućeg zračenja imaju dominantan efekat na površini poluprovodnika. Fizičko tumačenje efekata zračenja i temperature na koeficijent strujnog pojačanja tranzistora moguće je izvršiti analizom Mesindžer - Spratove relacije [8]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{SA_S W}{D_b A_e} + \frac{\sigma_b W}{\sigma_e L_e} + \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_b} \right)^2 \quad (8)$$

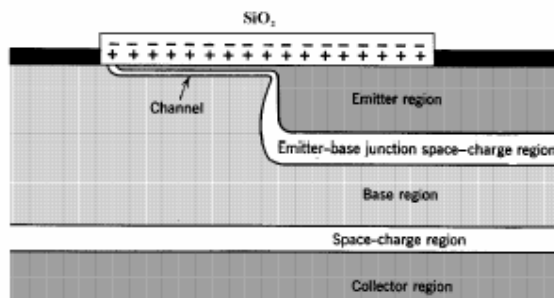
gde je: β - koeficijent strujnog pojačanja, S - brzina rekombinacije, A_S - površina oblasti na kojoj se vrši površinska rekombinacija, W - efektivna širina baze tranzistora, D_b - difuziona konstanta nosilaca u bazi, A_e - površina emitorskog spoja, σ_b - srednja provodnost baze, σ_e - srednja provodnost emitora, L_e - srednja dužina puta nosilaca u emitoru, L_b - srednja dužina puta manjinskih nosilaca u bazi. Prvi član jednačine sa desne strane karakteriše površinsku rekombinaciju, drugi član opisuje efikasnost emitora, dok treći član opisuje procese zapreminske rekombinacije u poluprovodniku tranzistora. U zavisnosti od tipa zračenja kome je integrisano kolo izloženo, kao i temperaturnih uslova, jedan od ovih članova postaje dominantan. Drugi član, $\sigma_b W / \sigma_e L_e$, prvenstveno zavisi od temperature, pa pitanje efikasnosti emitora postaje značajno tek na visokim temperaturama. Na treći član, $(1/2)(W/L_b)^2$, koji karakteriše zapreminsku rekombinaciju, dominantan je uticaj neutronske zračenja, kada je kritičan parametar za koeficijent strujnog pojačanja vreme života manjinskih nosilaca u bazi, τ . Uticaj jonizujućeg zračenja na degradaciju strujnog pojačanja tranzistora dominantno je izražen prvim članom, $SA_S W / D_b A_e$, što znači da jonizujuće zračenje primarni uticaj na karakteristike poluprovodnika ostvaruje na površini, za razliku od neutronske zračenja, kada se dominantni efekti ispoljavaju u dubini supstrata. Tada jednačina (8) može da se uprosti, zanemarivanjem drugog i trećeg člana [8]:

$$\Delta \left(\frac{1}{\beta_S} \right) = \frac{1}{\beta_S} - \frac{1}{\beta_{S0}} \approx \frac{SA_S W}{D_b A_e} = \frac{I_S}{I_e} \quad (9)$$

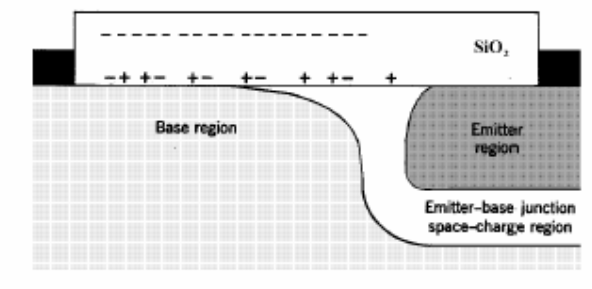
gde je β_S - strujno pojačanje usled površinske rekombinacije, β_{S0} - strujno pojačanje usled površinske rekombinacije pre početka zračenja ($\beta_S \ll \beta_{S0}$), I_S - struja površinske rekombinacije, I_e - struja emitora. Nakon dejstva zračenja dolazi do formiranja rekombinacionih centara u bazi tranzistora, kao i u sloju oksida između kontakata baze i emitora. Kako je pokretljivost šupljina mnogo manja od pokretljivosti elektrona, one bivaju zahvaćene, i u oksidu se formira ekvivalentno pozitivno naelektrisanje, koje teži

da se rekombinuje sa elektronima u silicijumu. Ovaj proces rekombinacije može da traje veoma dugo, i posledica je dejstva jonizujućeg zračenja na tranzistor. Pri dužem izlaganju jonizujućem zračenju ovaj mehanizam može da dovede do proboja i trajnog razaranja integrisanog kola. Ovaj proces dodatno pojačava postojanje polarizacije, odnosno ako tokom ozračivanja kola struja protiče kroz njegove tranzistore.

Na slici 4. prikazano je stanje npn tranzistora nakon apsorbovanja manje doze. Površinski sloj pozitivnih naelektrisanja je u ovoj fazi homogen, dok u oblasti baze počinje da se uspostavlja n - kanal. Dolazi do smanjenja strujnog pojačanja tranzistora, ali ovaj efekat u fazi apsorbovanja male doze nije značajnije izražen, jer je došlo do manjeg porasta površinske struje izazvanog uticajem zračenja. Na slici 5. je prikazano stanje npn tranzistora nakon apsorbovanja velike doze zračenja. Deo zahvaćenih naelektrisanja se u ovoj fazi rekombinuje sa elektronima, kanal u bazi se zatvara i više ne teče površinska struja, već generaciono - rekombinaciona struja u oblasti prostornih naelektrisanja. Sa povećanjem struje, raste osetljivost bipolarnog tranzistora na uticaj jonizujućeg zračenja. Potreba da se struja kolektora održi na konstantnoj vrednosti u uslovima rada sa velikim gustinama struje izaziva rast struje baze, a samim tim i povećanje širine baze, u skladu sa Kirkovim efektom. Povećanje širine baze se ostvaruje širenjem oblasti prostornog naelektrisanja baza - kolektor, što dovodi do povećanja vremena prolaska manjinskih nosilaca kroz bazu, odnosno smanjenja radne frekvencije tranzistora, f_T , i koeficijenta strujnog pojačanja, β [1].



Slika 4. Uspostavljanje provodnog kanala kroz bazu tranzistora nakon apsorbovanja manje doze jonizujućeg zračenja [6]



Slika 5. Širenje oblasti prostornih naelektrisanja nakon apsorbovanja veće doze jonizujućeg zračenja [6]

Brzina površinske rekombinacije predstavlja parametar koji je najosetljiviji na dejstvo jonizujućeg zračenja, i povećava se sa povećanjem apsorbirane doze zračenja, D. Da bi se povećala radijaciona otpornost bipolarnog tranzistora potrebno je, za konstantnu širinu baze, što više smanjiti poluprečnik emitora, što predstavlja problem pri radu tranzistora na većim temperaturama i sa velikom strujom, kada dolazi do smanjenja efektivne oblasti emitora [8].

3. EKSPERIMENT

Integrirani stabilizatori napona "National Semiconductor" LM2940CT5, "ST Microelectronics" L4940V5 i "Linear Technology" LT1086CT5 su ispitivani u Metrološko - dozimetrijskoj laboratoriji Instituta za nuklearne nauke "Vinča". Po deset integriranih kola iz iste serije svakog proizvođača je podeljeno u dve grupe. Po pet kola je ispitivano u polju γ zračenja, bez polarizacije, dok je naredna grupa od pet stabilizatora napona ispitivana sa opterećenjem tokom ozračivanja. U ovom slučaju je ulazni napon bio 7V, dok je izlazna struja održavana na 100 mA. Sva kola su izlagana zračenju na istim pozicijama u okolini izvora. Eksperiment je izveden uz pridržavanje odredbi standarda za ispitivanje integriranih kola na uticaj ukupne doze jonizujućeg zračenja MIL-STD-883F, metod 1019.6 [11].

Kola su napajana preko kablova dužine 10 metara, ukupne otpornosti $0,4\Omega$. Da bi se očuvala stabilnost rada, na krajevima kabla, odnosno ulaznim kontaktima kola na ispitnoj dvoslojnoj štampanoj kartici, montirani su aluminijumski elektrolitski kondenzatori kapacitivnosti $33\ \mu\text{F}$. Pored kablova za napajanje, paralelno su izvedeni i merni kablovi iste dužine. Na ovaj način je omogućeno direktno merenje napona i struje dok su kola ozračivana. Na kućišta integriranih kola (plastična, TO-220) montirani su aluminijumski hladnjaci toplotne otpornosti $14\ \text{K/W}$. Napajanje stabilizatora je vršeno pomoću izvora jednosmernog napona, kojim je omogućeno jednovremeno napajanje četiri galvanski izolovana kola. Filterski i izlazni kondenzatori su postavljeni prema preporukama proizvođača integriranih kola, radi postizanja stabilnih uslova rada i filtriranja naizmenične komponente napona. Merenje napona i struja je vršeno laboratorijskim instrumentima FLUKE 8050A, merne nesigurnosti $0,03\%$ [12]. Sva merenja, kao i zračenje komponenata, vršena su na sobnoj temperaturi od 190C . Izmerena je efektivna vrednost napona šuma u mernom krugu od oko $200\ \mu\text{V}$.

3.1. Merna metoda

Makroskopska veličina kojom je detektovana degradacija stabilizatora napona usled jonizujućeg zračenja je pad napona na serijskom tranzistoru. Ispitivanje pada napona na serijskom tranzistoru je vršeno na sledeći način: ulazni napon je podizan dok vrednost izlaznog napona ne dostigne $4,9\text{V}$, pri konstantnoj izlaznoj struji od $100\ \text{mA}$. Razlika ulaznog i izlaznog napona predstavlja vrednost pada napona na serijskom tranzistoru za datu struju.

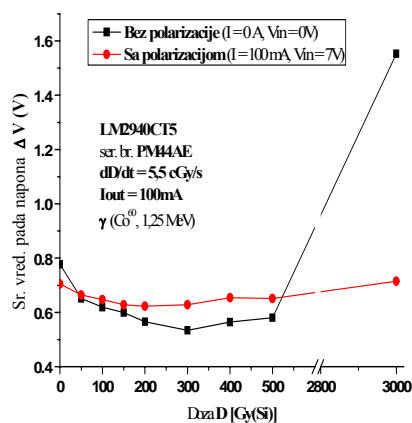
Kola su ozračivana do određenih vrednosti doza, nakon čega je prekidano ozračivanje, i ispitivane su sve četiri grupe kola. Da bi bio izbegnut uticaj efekta rekombinacije u poluprovodniku nakon ozračivanja, sva merenja su vršena u roku od najviše dva sata nakon prestanka dejstva zračenja [11],[13]. Nakon ispitivanja električnih karakteristika kola za određenu apsorbiranu dozu, nastavljano je dalje ozračivanje komponenata. Kola u polju γ zračenja izlagana su ukupnoj dozi od $3\ \text{kGy(Si)}$, uz jačinu doze od $5,5\ \text{cGy(Si)/s}$.

3.2. Izvor jonizujućeg zračenja i dozimetrija

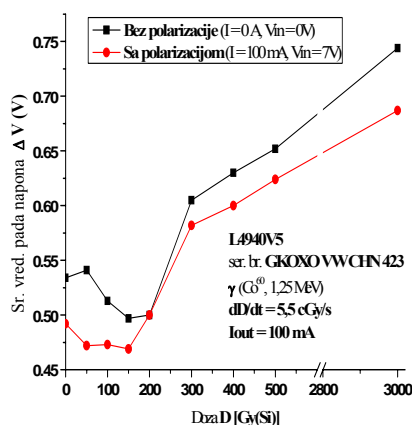
Kao izvor γ zračenja korišćen je ^{60}Co , smešten u uređaju za realizaciju polja γ zračenja u Metrološko - dozimetrijskoj laboratoriji Instituta za nuklearne nauke "Vinča". Izvor ^{60}Co proizveden je u Harwell Laboratory u Abingtonu, Velika Britanija. Aktivnost izvora ^{60}Co je na dan proizvodnje 28.8.1990. iznosila $A=124,1$ TBq, a vreme poluraspada ovog izvora zračenja je $T_{1/2} = 5,272$ godina. Srednja energija γ fotona je $E_{\gamma} = 1,25$ MeV. Uzorci su izlagani zračenju u čeljusti kolimatora [12].

Merenje jačina ekspozicionih doza je vršeno jonizacionom komorom "Dosimontor" PTW M23361, zapremine $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$, sa greškom merenja $\pm 2\%$. Uz jonizacionu komoru korišćen je čitač D14 [12].

4. REZULTATI



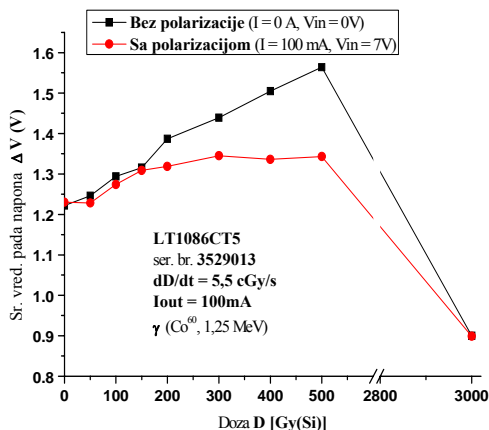
Slika 6. Promena pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona LM2940CT5 pod uticajem γ zračenja



Slika 7. Promena pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona L4940V5 pod uticajem γ zračenja

Na slici 6 prikazana je promena srednje vrednosti pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona LM2940CT5 u zavisnosti od ukupne apsorbovane doze γ zračenja. Doze do 500 Gy(Si) ne utiču značajno na pad napona na serijskom tranzistoru ispitivanih kola. Međutim, nakon apsorbovanja većih doza uočava se značajno povećanje pada napona na serijskom tranzistoru, koje je mnogo više izraženo kod nepolarizovanih u odnosu na polarizovane komponente. Znatno manje radijaciona otpornosti nepolarizovanih u odnosu na polarizovane stabilizatore napona potiče od prisustva plitkih zahvata naelektrisanja u izolacionom oksidu [16]. Plitki zahvati pozitivnih naelektrisanja se rekombinuju sa elektronima koji protiču kroz serijski tranzistor, ispod površine oksida, prilikom postojanja polarizacije tokom ozračivanja, što utiče na smanjenje degradacije koeficijenta strujnog pojačanja serijskog tranzistora. Polarizovana kola u celom opsegu doza zračenja, od 0 do 3 kGy(Si), pokazuju mala odstupanja pada napona na serijskom tranzistoru. Kod nepolarizovanih kola je znatno više izražen uticaj zahvata pozitivnih naelektrisanja u početnom periodu ozračivanja,

kod nezasićenog oksida. Zahvat naelektrisanja kod manjih doza izazivao je smanjenje pada napona na serijskom tranzistoru. Do smanjenja pada napona na serijskom pnp tranzistoru je dolazilo zbog intenzivnog zahvata naelektrisanja u izolacionom oksidu na početku ozračivanja. Izolacioni oksidi visokog faktora dielektričnih gubitaka imaju realtivno veliku provodnost i u početnoj fazi izlaganja jonizujućem zračenju dolazi do intenzivnog zahvata pozitivnih naelektrisanja u oksidu, izazivajući povećanje struje površinske rekombinacije, uspostavljanja provodnog kanala kroz bazu i smanjenja koeficijenta strujnog pojačanja [8]. Nakon apsorbovanja nešto veće doze jonizujućeg zračenja dolazi do zasićenja oksida u zahvatu pozitivnih naelektrisanja, uz povećani nivo rekombinacije zahvaćenih pozitivnih naelektrisanja. Ova pojava može da dovede do blagog oporavka karakteristika serijskog tranzistora stabilizatora napona na srednjim dozama, kada dolazi do povećanja nivoa rekombinacije zahvaćenih šupljina u oksidu sa elektronima u poluprovodniku [17]. Značajan pad kolektorske struje usled postojanja intenzivnog zahvata pozitivnih naelektrisanja u oksidu utiče na prenosnu karakteristiku bipolarnog tranzistora ($i_C = f(v_{BE})$), izazivajući smanjenje napona v_{CE} , odnosno pada napona na serijskom tranzistoru [14].



Slika 8. Promena pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona LT1086CT5 pod uticajem γ zračenja

Na slici 7 je prikazana promena srednje vrednosti pada napona u funkciji apsorbovane doze γ zračenja na serijskom tranzistoru kola L4940V5 [12]. Postoji trend sporog povećanja pada napona na serijskom tranzistoru, koji je nešto izraženiji kod nepolarizovanih kola. Uočava se funkcionalnost kola i nakon izlaganja veoma visokim dozama. Prikazana odstupanja pada napona na serijskom tranzistoru su prihvatljiva, i ne pogoršavaju drastično karakteristike kola. Razlika u početnim vrednostima pada napona, pri dozi od 0 Gy, potiče od razlika vrednosti ovog parametra kod uzoraka koji su bili ispitivani i za koje je izračunata srednja vrednost [18]. Uočava se stabilnost karakteristika kola i funkcionalnost kola pri veoma visokim dozama. Ipak, i kod kola L4940V5 uočava se blaga degradacija karakteristika na početku procesa ozračivanja, kada dolazi do nešto većeg zahvata naelektrisanja u oksidu [15]. Prikazana odstupanja pada napona na serijskom tranzistoru su prihvatljiva i ne pogoršavaju drastično karakteristike kola. Uočava se nešto veća osetljivost nepolarizovanih kola na dejstvo zračenja nakon apsorbovanja veće doze. Nijedno od deset kola, ni u režimu ispitivanja

bez polarizacije, ni pri postojanju opterećenja i ulaznog napona tokom zračenja, nije prestalo da funkcioniše, niti je izlazni napon pao ispod granice od 4,9V.

Na slici 8 prikazana je zavisnost pada napona u funkciji doze γ zračenja kola LT1086CT5. Prilikom ispitivanja pada napona na rednom tranzistoru uočena je velika razlika u karakteristikama nepolarizovanih i polarizovanih komponenata. Kod svih kola ispitivanih u polju γ zračenja došlo je do proboja kolektor - emitor i otkaza serijskog tranzistora nakon apsorbovanja doze od 3 kGy(Si). Za doze do 500 Gy(Si), stabilizator LT1086CT5 stabilno radi, a pad napona na serijskom tranzistoru postaje nešto veći nakon doze 200 Gy(Si). Degradacija koeficijenta strujnog pojačanja serijskog npn tranzistora, posebno kod polarizovanih komponenata, nešto je manje izražena u oblasti srednjih apsorbovanih doza zračenja u odnosu na kola sa serijskim pnp tranzistorom. Razlog je mnogo veća osetljivost pnp tranzistora na gubitak strujnog pojačanja u odnosu na npn tranzistor, koji je serijski element stabilizatora napona LT1086CT5 [12]. Pri velikim kolektorskim strujama pada efikasnost emitora, što izaziva pad strujnog pojačanja tranzistora, koje je mnogo manje kod pnp tranzistora, pa zbog toga karakteristike pada napona stabilizatora napona sa serijskim npn tranzistorom na velikim strujama postaju nešto povoljnije [15]. Pomenuta pojava je znatno izraženija tokom rada sa većom strujom polarizacije [12].

5. ZAKLJUČAK

Ispitivanjem karakteristika stabilizatora napona uočena je razlika u radijacionoj otpornosti tri tehnološka procesa za sintezu analognih bipolarnih integrisanih kola. Predstavljeni rezultati ukazuju na znatno veću osetljivost na uticaj γ zračenja stabilizatora napona sa lateralnim serijskim pnp tranzistorom u odnosu na kola sa vertikalnim pnp tranzistorom i npn tranzistorom. Efekat zračenja se ogleda u povećanju pada napona na serijskom tranzistoru, i znatno je više izražen na nepolarizovanim komponentama. Ustanovljeno je da ICV PNP (eng. Isolated Collector Vertical PNP Transistor) komercijalni tehnološki postupak izrade vertikalnog serijskog pnp tranzistora na integrisanom stabilizatoru napona L4940V5 kompanije "ST Microelectronics" pokazuje otpornost na izlaganje dozi γ zračenja od 3 kGy(Si), uz minimalne degradacije karakteristika na svim komponentama, bez obzira na prisustvo polarizacije. Pored velikog uticaja geometrije serijskog tranzistora, uočen je i visok kvalitet pasivizacionih slojeva, što stabilizatoru napona sa vertikalnim serijskim tranzistorom L4940V5 daje mogućnost primene u radijacionom okruženju u kome se očekuje apsorbovanje doze jonizujućeg zračenja od 3 kGy(Si) (tri puta više od vrednosti zahtevane za primene na satelitima Evropske svemirske agencije (ESA) [1]). Nije uočena značajnija razlika u karakteristikama kola koja su bila polarizovana tokom ozračivanja u odnosu na nepolarizovane komponente. Sva kola su nakon ozračivanja ostala potpuno funkcionalna.

Za razliku od kola L4940V5, stabilizator napona "National Semiconductor" LM2940CT5 sa lateralnim serijskim tranzistorom je pokazao nisku otpornost na uticaj jonizujućeg zračenja. Velika razlika u padu napona na serijskom tranzistoru između polarizovanih i nepolarizovanih komponenata ukazuje na visok faktor dielektričnih gubitaka izolacionog oksida. Navedeni razlozi navode na zaključak da treba izbegavati primenu kola LM2940CT5, odnosno stabilizatora napona sa lateralnim serijskim tranzistorom u svim uslovima gde se očekuje uticaj jonizujućeg zračenja.

Kolo "Linear Technology" LT1086CT5 je nešto starije konstrukcije, sa serijskim tranzistorom koji sačinjava sprega serijskog npn i pobudnog pnp tranzistora, zbog čega na njemu postoji veći pad napona u odnosu na druge ispitivane komponente. Ovaj

stabilizator napona je pokazao solidnu otpornost na uticaj jonizujućeg zračenja, pre svega zbog velikog strujnog pojačanja serijskog npn tranzistora, ali i njegove veće radijacione otpornosti u odnosu na pnp tranzistor. Zbog toga je degradacija stabilizatora napona LT1086CT5 bila nešto sporija. Kolo je pokazalo veću pouzdanost tokom rada sa polarizacijom u odnosu na funkcionisanje nepolarizovanih komponenata. Povoljna strana kola LT1086CT5 je približavanje vrednosti pada napona na serijskom tranzistoru prilikom proticanja velikih struja padu napona na LDO stabilizatorima napona. Zbog toga ovo kolo može da nađe primenu u okruženju u kome se ne očekuju ukupne doze jonizujućeg zračenja veće od 50 krad(Si).

LITERATURA

- [1] Laurent Dusseau, *Introduction to Radiation Issues of Commercial-Off-The-Shelf (COTS) components*, CERN training, 2000.
- [2] *LT1086 1.5A Low Dropout Positive Regulators, Adjustable and Fixed 2.85V, 3.3V, 3.6V, 5V, 12V*, Linear Technology Corporation, 1988.
- [3] *LM2940 1A Low Dropout Voltage Regulator*, National Semiconductor, 2003.
- [4] *L4940 Series - Very Low Dropout 1.5A regulators*, STMicroelectronics, 2003.
- [5] Spasoje Tešić, Dragan Vasiljević, *Osnovi elektronike*, Grosknjiga, Beograd, 1995.
- [6] Feliciano Giustino, "Radiation Effects on Semiconductor Devices - Study of the Enhanced Low Dose Rate Degradation", PhD Thesis, Politecnico Di Torino, 2001.
- [7] Milan Tadić, Rifat Ramović, *Zbirka zadataka iz mikroelektronike*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2001.
- [8] George C. Messenger, Milton S. Ash, *The Effects of Radiation on Electronic Systems*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- [9] Paolo Antoniazzi, Arturo Wolfsgruber, *Very Low Dropout Regulators Enhance Supply Performance*, SGS-Thomson Microelectronics, 1995.
- [10] Federico Faccio, *Radiation effects in the electronics for CMS*, CERN training, 2001.
- [11] *Method 1019.6: Ionizing Radiation (Total Dose) Test Procedure*, United States Department of Defence - Test Method Standard Microcircuits MIL-STD 883, 2003.
- [12] Vladimir Vukić, "Uticaj uslova eksploatacije na karakteristike stabilizatora napona", Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 2005.
- [13] Steven S. McClure, Jerry L. Gorelick, Ron Pease, Allan H. Johnston, "Dose Rate and Bias Dependency of Total Dose Sensitivity of Low Dropout Voltage Regulators", *IEEE Radiation Effects Data Workshop, IEEE Doc. 00TH8527*, pp. 100-105, 2000.
- [14] Andrew Holmes-Siedle, Len Adams, *Handbook of radiation effects*, Oxford University Press, New York, 2002.
- [15] Schmidt, D.M. et al, "Modeling ionizing radiation induced gain degradation of the lateral PNP bipolar junction transistor", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Volume 43, pp. 3032-3039, 1996.
- [16] Vladimir Vukić, Predrag Osmokrović, Srboljub Stanković: "Influence of Medium Dose Rate X and Gamma Radiation and Bias Conditions on Characteristics of Low-

Dropout Voltage Regulators with Lateral and Vertical Serial PNP Transistors", *8th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems RADECS 2005*, Cap d'Agde, Francuska, 2005.

- [17] V. Vukić, P. Osmokrović, S. Stanković, M. Kovačević, "Promena izlazne struje stabilizatora napona sa serijskim PNP tranzistorom nakon izlaganja jonizujućem zračenju srednje jačine doze", *XXIII Simpozijum Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, str. 177-182, Donji Milanovac, 2005.
- [18] V. Vukić, P. Osmokrović, S. Stanković, M. Kovačević, "Uticaj X i γ zračenja i uslova polarizacije na pad napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona", *XLIX Konferencija "ETRA"*, IV sveska, str. 72-75, Budva, 2005, .

Abstract: The aim of this paper is presentation of radiation reliability examinations of low-dropout voltage regulators with three different applied solutions of series transistor synthesis. Configurations with vertical npn transistor, lateral pnp and vertical pnp transistor were tested. Theoretical fundaments of bipolar transistor construction and interaction of ionizing radiation with semiconductor and insulator material in integrated circuits were exposed. Examination results of voltage regulator's series transistor dropout voltage as function of total ionizing dose were presented.

Key words: *bipolar transistor, voltage regulator, ionizing radiation, surface recombination, charge trapping, forward emitter current gain*

INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON CHARACTERISTICS OF LOW-DROPOUT VOLTAGE REGULATORS

Vladimir Vukić