

**ODZIV INTEGRISANOG KOLA IZRAĐENOG PRIMENOM "BiFET"
PROCESA U POLJU X ZRAČENJA**

Vladimir Vukić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Sadržaj: Standardni proces za proizvodnju integrisanih kola sastavljenih od bipolarnih i JFET tranzistora podvrgnut je ispitivanju u polju X zračenja. Za ispitivanje karakteristika "BiFET" procesa izabran je pozitivni stabilizator napona LM2940CT5. Pomenuto integrisano kolo sadrži upravljači sklop, kao i serijski energetski tranzistor, sastavljen od 350 elementarnih lateralnih PNP tranzistora. Ispitivanje kola je vršeno snimanjem karakteristika naponske regulacije i praćenjem promena izlaznog napona. Iako je izlazni napon polarizovanih uzoraka ostao u prihvatljivim granicama i nakon apsorbovanja većih doza X zračenja, karakteristike regulacije su ukazale na potpuni funkcionalni otkaz komponenata nakon apsorbovanja doze 60 krad(Si). Identifikovani su osnovni mehanizmi degradacije "BiFET" procesa.

Ključne reči: BiFET proces, integrisano kolo, lateralni PNP tranzistor, naponska regulacija, zahvati naelektrisanja u oksidu, spojni zahvati, X zračenje

1. UVOD

Tema istraživanja predstavljenog u ovom radu je ispitivanje karakteristika bipolarnog/FET procesa za sintezu analognih integrisanih kola nakon izlaganja X zračenju srednje jačine doze. Predstavnik integrisanih kola projektovanih primenom "National Semiconductor" BiFET procesa je LDO (low-dropout) stabilizator napona LM2940CT5, sa lateralnim energetskim PNP tranzistorom. Pomenuti proces se koristi u proizvodnji analognih integrisanih kola koja imaju bar jedan JFET tranzistor [1]. Pored mogućnosti formiranja vertikalnih NPN i JFET tranzistora, važna karakteristika BiFET postupka je mogućnost sinteze lateralnih PNP tranzistora, uključujući i energetske tranzistore čija struja prelazi jedan amper. Tako stabilizator napona LM2940CT5 predstavlja kolo srednjeg nivoa integracije sa vertikalnim NPN i lateralnim PNP tranzistorima, JFET tranzistorima, kao i lateralnim PNP energetskim tranzistorom. Uzimajući u obzir pretpostavljenu neotpornost lateralnog PNP tranzistora na uticaj radioaktivnog zračenja, može se pretpostaviti da će serijski PNP tranzistor biti najslabija tačka kola pri ispitivanju radijacione otpornosti. Budući da se energetski PNP tranzistor sastoji od 350 paralelno povezanih PNP tranzistora [3], što obezbeđuje maksimalnu struju kolektora od 1 amper, može se pretpostaviti da ovako veliki broj paralelnih elemenata može da obezbedi veću redundansu, odnosno veću radijacionu otpornost serijskog tranzistora i celog BiFET procesa.

Još jedna karakteristika BiFET procesa koja može da poveća radijacionu otpornost kola je primena površinskog stabilizacionog sloja izolacionog oksida i poluprovodnika [1],[4]. Stabilizacioni sloj sa niskom koncentracijom nečistoća arsena (As) bi mogao da suzbije porast brzine površinske rekombinacije i zahvata naelektrisanja u oksidu, obezbeđujući rad kola nakon izlaganja većim dozama jonizujućeg zračenja. Takođe,

mali odnos obim - površina (perimeter-to-area ratio) energetskog PNP tranzistora izrađenog pomoću BiFET procesa [2] čini ga kandidatom za visoku radijacionu otpornost, budući da je povećanje normalizovane struje baze i osiromašenje površinske oblasti direktno proporcionalno odnosu obim - površina.

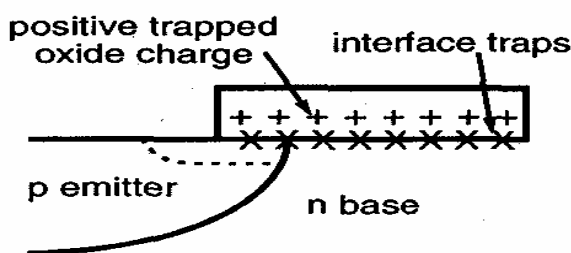
Neki autori smatraju da su PNP tranzistori otporniji od NPN uređaja zbog toga što baza N-tipa nije osiromašena, a i emitor P-tipa je jako dopiran, što zahteva veliku gustinu površinskih naelektrisanja u oksidu za osiromašenje površine poluprovodnika. Takođe, zahvati na spoju poluprovodnik-oksid (interface traps) se pod uticajem ivičnog električnog polja pretežno koncentrišu na emitorskoj strani spoja baza - emitor [5].

Pomenuti razlozi daju mogućnost da "National Semiconductor" BiFET komercijalni postupak poseduje značajnu radijacionu otpornost za upotrebu u nuklearnim reaktorima i akceleratorskim sistemima.

2. TEORIJA

2.1. Radijacione karakteristike bipolarnog lateralnog PNP tranzistora

Oštećenja bipolarnog tranzistora izazvana uticajem jonizujućeg zračenja primarno se manifestuju raskidanjem hemijskih veza kristalne rešetke molekula, odnosno zahvatom pozitivnog naelektrisanja na spoju Si/SiO₂ ili u dubini oksida [6]. Zahvaćeno naelektrisanje formira oblasti inverznog naelektrisanja, povećavajući generaciono - rekombinacione struje i izazivajući skraćanje vremena života manjinskih nosilaca. Makroskopska posledica ovog efekta je smanjenje koeficijenta strujnog pojačanja i pojava struje curenja na spoju baza - emitor [6]. Degradacija pojačanja NPN tranzistora izazvana jonizujućim zračenjem prvenstveno potiče od povećane rekombinacije u oblasti prostornih naelektrisanja na spoju baza - emitor. Povećanje nivoa rekombinacije potiče od dva mehanizma: povećanja brzine površinske rekombinacije, izazvane stanjima na spoju Si/SiO₂ u blizini energetskog procepa, i osiromašenje površine silicijuma, izazvano povećanjem površinskog potencijala, nastalog kao posledica zahvata naelektrisanja u oksidu. Oblasti zahvaćenih pozitivnih naelektrisanja i spojni zahvati su prikazani na slici 1. Struja baze se povećava kao funkcija količine zahvaćenog naelektrisanja u oksidu, pa na taj način naelektrisanje u oksidu dominira odzivom tranzistora u radijacionom okruženju u slučaju proticanja struje kroz tranzistor tokom ozračivanja [7].



Slika 1. Pozitivno naelektrisanje zahvaćeno u oksidu (positive trapped oxide charge) i zahvati na spoju Si/SiO₂ (interface traps) u lateralnom PNP tranzistoru [7]

Zbog manjeg strujnog pojačanja i niže radne frekvencije, PNP tranzistori su osetljiviji na izlaganje jonizujućem zračenju u odnosu na NPN tranzistore [6].

Zahvaljujući mehanizmu površinske rekombinacije, uticaj jonizujućeg zračenja je više izražen kod lateralnih tranzistora, kod kojih struja teče neposredno ispod oksida, nego kod vertikalnih tranzistora, kod kojih struja teče kroz supstrat poluprovodnika [7]. Ipak, tehnološka realizacija lateralnog tranzistora je mnogo jednostavnija, a strujno pojačanje je nešto veće u odnosu na vertikalni supstratski PNP tranzistor.

Postoje četiri mehanizma koji mogu da izazovu degradaciju koeficijenta strujnog pojačanja PNP tranzistora: Oni su: 1. osiromašenje emitora P-tipa; 2. rekombinacija na površini baze; 3. injekcija elektrona u emitor i 4. površinsko osiromašenje šupljina [7].

Nakon izlaganja jonizujućem zračenju, pozitivno naelektrisanje se akumulira u oksidu iznad spoja baza - emitor. Zahvaćeno pozitivno naelektrisanje odbija šupljine ka emitoru P-tipa, vršeći i akumulaciju naelektrisanja u bazi, što rezultuje širenjem oblasti prostornih naelektrisanja uz površinu oksida ka emitoru. Osiromašenje površine izaziva porast rekombinacije, rezultujući povećanjem struje baze [7]. Ovaj mehanizam je najviše izražen kod tranzistora sa slabo dopiranim emitorom, budući da oblast prostornih naelektrisanja može da se proširi duboko u unutrašnjost emitora.

U slučaju povećane rekombinacije na površini baze N-tipa, spojni zahvati povećavaju degradaciju koeficijenta strujnog pojačanja. Zahvati na spoju Si/SiO₂ povećavaju brzinu površinske rekombinacije na površini baze. Zahvaćena pozitivna naelektrisanja utiču na površinu oblasti baze tranzistora, dovodeći do smanjenja nivoa rekombinacije na površini, budući da je nivo rekombinacije maksimalan kada su nivoi elektrona i šupljina jednaki [7]. Brzina površinske rekombinacije je obrnuto proporcionalna vremenu života elektrona i šupljina. Sa povećanjem zahvata na spoju poluprovodnik - oksid, smanjuju se vremena života nosilaca, izazivajući povećanje brzine površinske rekombinacije.

U skladu sa Šokli - Rid - Holovom (SRH) teorijom rekombinacije, nivo rekombinacije naelektrisanja na površini može da bude predstavljen kao funkcija lateralne pozicije, y , izrazom [8]:

$$R_s(y) = \frac{n_i v_{surf} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{2kT}\right)}{2 \cosh\left[\frac{q}{kT}\left(\psi_s(y) - \frac{V_{BE}}{2}\right)\right]} \quad (1)$$

U ovoj jednačini n_i je sopstvena koncentracija nosilaca, ψ_s je površinski potencijal i V_{BE} je napon baza - emitor bipolarnog tranzistora. Brzina površinske rekombinacije je data izrazom: $v_{surf} = \sigma v_{th} N_T$, gde je σ poprečni presek zahvata, v_{th} je termička brzina nosilaca, a N_T je koncentracija zahvaćenih naelektrisanja.

Pozitivno naelektrisanje zahvaćeno u oksidu iznad spoja baza - emitor utiče na površinu baze, vršeći lokalnu konverziju spoja baza - emitor iz P+-N spoja u P+-N+. Kada se P-N spoj direktno polariše, šupljine bivaju prenete iz emitora P-tipa u bazu N-tipa, dok elektroni prelaze iz baze N-tipa u emitor P-tipa. Zbog toga mnogi elektroni mogu da budu ubačeni iz baze u emitor, rezultujući porastom struje baze [7].

Mehanizam smanjenja koncentracije šupljina na površini poluprovodnika je vezan za putanju kojom se kreću šupljine ubačene iz baze. Sa povećanjem količine pozitivnog naelektrisanja, šupljine se udaljavaju od površine. Budući da se šupljine povlače dublje

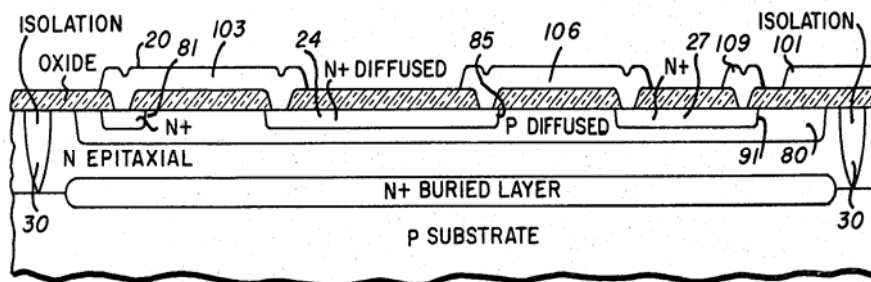
u poluprovodnik, putanja koju šupljine moraju da pređu da bi stigle do kolektora postaje sve duža, što praktično povećava širinu baze. Nivo rekombinacije se povećava zbog toga što šupljine putuju prema N^+ ukopanom sloju. Vreme života šupljina se skraćuje zbog potiskivanja šupljina u jako dopiranu oblast, izazivajući povećanje nivoa rekombinacije, što se manifestuje povećanjem struje baze. Kod lateralnog PNP tranzistora, aktivna oblast baze je deo baze smešten između emitora P-tipa i kolektora, zbog čega struja teče lateralno duž površine poluprovodnika. Mehanizam površinske rekombinacije, poput rekombinacije na površini baze i osiromašenja šupljina na površini poluprovodnika, ima veliki značaj kod lateralnih struktura [7].

Degradacija lateralnih komponenata je zavisna od nivoa dopiranja emitora. Lateralni PNP tranzistori sa jako dopiranim emitorima imaju veće inicijalno strujno pojačanje, a i manje su osetljivi na uticaj jonizujućeg zračenja. Slabo dopirani emitori dopuštaju veće širenje oblasti prostornih naelektrisanja u unutrašnjosti emitora, pa nastala povećana rekombinacija nadjačava uticaj zahvata pozitivnih naelektrisanja u oksidu na smanjenje širine oblasti prostornih naelektrisanja [9]. Ovaj efekat nastaje zbog toga što zahvaćeno pozitivno naelektrisanje povećava rekombinaciju u emitorima slabo dopiranih tranzistora, izazivajući brži porast struje baze nego što je to slučaj u jako dopiranim tranzistorima [10]. Tako rekombinacija u oblasti baze, izazvana spojnim zahvatima, biva umanjena uticajem zahvaćenog pozitivnog naelektrisanja u oksidu. Za razliku od procesa u bazi PNP tranzistora, uticaji spojnih zahvata i zahvata u oksidu u oblasti emitora su aditivni. Kao rezultat nastaje visok nivo rekombinacije u emitorskoj oblasti prostornih naelektrisanja na spoju baza - emitor. Zbog dominantnog uticaja zahvata naelektrisanja na spoju Si/SiO_2 , može se smatrati da je nivo rekombinacije u emitoru funkcija spojnih zahvata naelektrisanja i nivoa dopiranosti emitora.

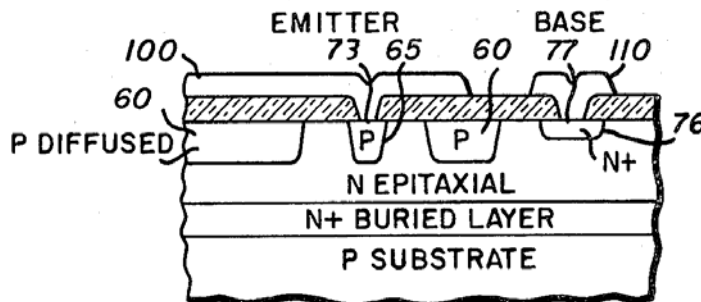
Pored povećanja struje baze, kod lateralnih PNP tranzistora i blagi porast struje kolektora doprinosi degradaciji koeficijenta strujnog pojačanja. Struja kolektora se značajno menja u zavisnosti od ukupne doze jonizujućeg zračenja. Budući da se struja baze zapravo smanjuje nakon apsorbovanja malih doza, strujno pojačanje ostaje gotovo konstantno u oblasti malih doza zračenja. Nakon apsorbovanja većih doza jonizujućeg zračenja, sa porastom struje baze na ozračenom tranzistoru se ispoljava znatan pad strujnog pojačanja. Smanjenje struje kolektora ima jak uticaj na degradaciju pojačanja. Do smanjenja struje kolektora tranzistora sa jako dopiranim emitorima dolazi zbog ispoljavanja dva efekta: rekombinacije u neutralnoj oblasti baze i smanjenja efikasnosti emitora [10].

Povećana rekombinacija u oblasti osiromašenih naelektrisanja na spoju baza - emitor ne dovodi do smanjenja kolektorske struje na dati nivo polarizacije zbog toga što broj nosilaca injektiranih u bazu zavisi samo od dopiranosti baze i primenjene polarizacije. Ako se rekombinacija poveća u oblasti prostornih naelektrisanja, struje emitora i baze se povećavaju, ali struja kolektora ostaje konstantna. Ipak, kada se injektirani nosioci naelektrisanja rekombinuju u neutralnoj oblasti baze, oni ne stižu do kolektorskog spoja i struja kolektora se smanjuje. Pošto ukupna struja znatno zavisi od nosilaca injektiranih u blizini površine poluprovodnika, dolazi do znatnog pada kolektorske struje nakon ozračivanja tranzistora. Ovaj efekat dovodi do smanjenja efikasnosti emitora [10]. Efikasnost emitora se povećava sa smanjenjem širine baze i povećanjem odnosa obim - površina. Visok odnos obim - površina omogućava smanjenje otpornosti baze, odnosno manje narušavanje efikasnosti emitora, ali čini tranzistore veoma osetljivim na uticaj jonizujućeg zračenja, prvenstveno zbog velike površine spoja baza - emitor.

Stabilizator napona "National Semiconductor" LM2940CT5 je analogno integrisano bipolarno kolo napravljeno pomoću "Pojednostavljenog BiFET procesa" ("Simplified BiFET process") [1]. Najveći deo površine čipa zauzimaju serijski PNP tranzistor i njegov pobudni tranzistor. Serijski PNP tranzistor je sastavljen od 350 paralelno povezanih PNP tranzistora, što omogućava proticanje maksimalne izlazne struje od oko 1050 mA za $\beta = 15-20$, uz struju prema masi ("struja curenja") od 50 - 60 mA [2], [3]. Svaki tranzistor može da obezbedi struju od 3 mA, pa se povećanje struje integrisanog kola postiže paralelnim vezivanjem tranzistora u strukture sa balastnim otpornicima. Za primenjeni BiFET proces, parametri jednog PNP tranzistora su: $\beta = 24$ (za $I = 1$ mA), $BV_{CB0} = 94V$ (probojni napon kolektor - emitor sa otvorenom bazom), $f_T = 2.5$ MHz (maksimalna frekvencija) [11]. Redni PNP tranzistor je formiran od manjih grupa, sastavljenih od po 18 i 24 osnovnih PNP tranzistora, gde su veće grupe od po 24 tranzistora bliže ulaznoj elektrodi baze, dok su manje grupe pozicionirane između kolektorskih i emitorskih kontakata. Površina PNP tranzistora je oko 2,4 mm², dok je površina PNP pobudnog tranzistora, sastavljenog od 70 osnovnih PNP tranzistora, oko 0,5 mm², što zajedno predstavlja oko dve trećine površine integrisanog kola [1].



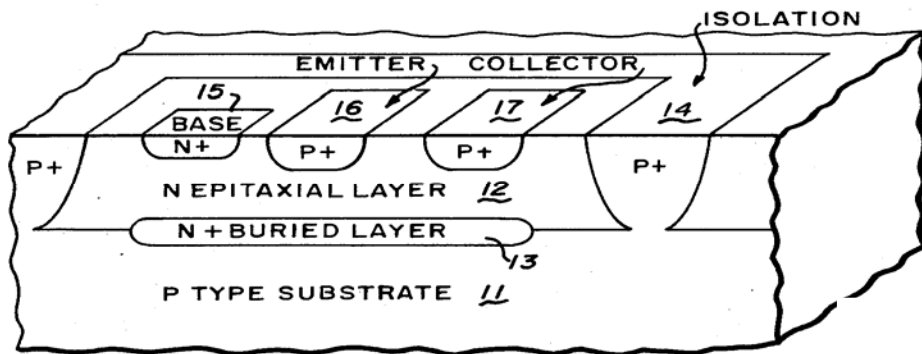
Slika 4. Poprečni presek centralne oblasti lateralnog PNP energetskog tranzistora [2]



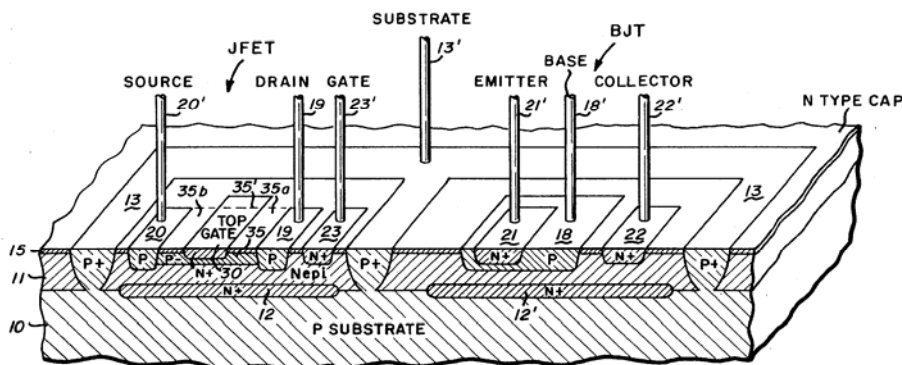
Slika 5. Poprečni presek osnovnog lateralnog PNP tranzistora sa slike 2 [2]

Izgled serijskog PNP tranzistora i oblasti metalizacije su prikazani na slikama 2 i 3, dok su poprečni preseki (površi 4 i 5 na slici 2) prikazani na slikama 4 i 5 [2]. Na slici 2 tranzistori su grupisani u sekcije od po šest i devet elemenata, međusobno odvojene balastnim otpornikom. Emitori su okrugli, prečnika oko 13 μ m. Između difuzionih oblasti kolektora i emitora su prstenovi baze, koji pripadaju epitaksijalnom sloju N tipa [2]. Poprečni presek jednog lateralnog PNP tranzistora prikazan je na slici 6.

Proizvodnja integrisanog kola nastalog primenom "pojednostavljenog BiFET procesa" kompanije "National Semiconductor" počinje obradom poluprovodnika ("wafer") debljine 400 - 500 μm i otpornosti 4 $\Omega\cdot\text{cm}$. Debljina epitaksijalnog sloja N tipa je 15 μm , nastalog difuzijom arsenovih (As) nečistoća koncentracije 10^{15} cm^{-3} . Ispod epitaksijalnog sloja je visokodopirani N+ ukopani sloj (slika 7), provodnosti 20 Ω/\square , nastao sporom difuzijom arsenovih (As) nečistoća [1]. Izolacija od drugih tranzistora je izvedena pomoću P+ izolacionog prstena, stvorenog difuzijom bora kroz epitaksijalni sloj. Na epitaksijalnom sloju su kreirane P+ oblasti emitora i kolektora difuzijom bora do dubine 3 μm , koncentracije atoma $2\cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$. Na kraju je sprovedeno generisanje pasivizacionih slojeva, stvarivši sloj oksida SiO_2 debeo oko 500 nm [1]. Pored pravljenja lateralnih PNP tranzistora, BiFET process omogućava realizaciju vertikalnih NPN tranzistora, kao i JFET tranzistora korišćenjem istih proizvodnih postupaka. Poput realizacije P+ oblasti za kolektore i emitore lateralnih tranzistora sa difuzijom bora do dubine 3 μm , u istom koraku je moguća realizacija baze NPN tranzistora, kao i drejna i sorsa N-kanalnog JFET-a. Kolektor i emitor NPN tranzistora, baza PNP lateralnog tranzistora i gejt JFET-a su stvoreni difuzijom fosfora (P) do dubine 2 μm , sa koncentracijom nečistoća 10^{19} cm^{-3} [1].



Slika 6. Poprečni presek BiFET strukture (lateralni PNP tranzistor)[11]



Slika 7. Poprečni presek BiFET strukture (JFET i vertikalni NPN tranzistor) [1]

Kanal gejta JFET-a (N+) je formiran jonskom implantacijom fosfora (P), energije jona 25 keV i koncentracije 10^{14} cm^{-3} . Širina kanala gejta je oko 8 μm , dok je rastojanje između drejna i sorsa oko 23 μm . P-kanal JFET-a je formiran pomoću dva koraka jonske implantacije bora, obezbeđujući "dvovrbi" profil koncentracija nečistoća:

$1,1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 190 keV, praćen implantacijom jona bora parametara $1,1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 100 keV. Dubina P-kanala JFET-a je oko $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ [1]. Dodatni stabilizacioni sloj nastao implantacijom jona na površini epitaksijalnog sloja ("cap"), tačno ispod sloja oksida, predstavlja specifičnost BiFET procesa. Funkcija slabo dopiranog sloja N tipa sa arsenom (As) nečistoćama ($Q = 2,3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 40 keV) je da učini poluprovodnik neosetljivim kako na uticaj nečistoća u oksidu (SiO_2), tako i na uticaj površinskih stanja nastalih između poluprovodnika i oksida [4]. Nestabilnosti na površini poluprovodnika su najviše izražene tokom izlaganja jonizujućem zračenju, kada dolazi do povećanja brzine površinske rekombinacije. Na ovaj način nastaje osiromašenje poluprovodnika ili čak njegova inverzija, kao i zahvat naelektrisanja u izolacionom oksidu, izazivajući uspostavljanje provodnog kanala kroz bazu tranzistora, povećanje šuma, smanjenje koeficijenta strujnog pojačanja i, generalno, degradaciju karakteristika tranzistora [4].

3. EKSPERIMENT

Integrirani stabilizatori napona "National Semiconductor" LM2940CT5 su ispitivani u Metrološko - dozimetrijskoj laboratoriji Instituta za nuklearne nauke "Vinča". Po pet kola je ispitivano u polju X 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.

Kola su napajana preko kablova dužine 10 metara, ukupne otpornosti $0,4\Omega$. Na kućišta integriranih kola (plastična, TO-220) montirani su aluminijumski hladnjaci toplotne otpornosti 14 K/W. Napajanje stabilizatora je vršeno pomoću izvora jednosmernog napona, kojim je omogućeno jednovremeno napajanje četiri galvanski izolovana kola. Merenje napona i struja je vršeno laboratorijskim instrumentima FLUKE 8050A, merne nesigurnosti 0,03% [12]. Sva merenja, kao i ozračivanje komponenata, vršeni su na sobnoj temperaturi od 19°C . Detaljniji opis eksperimenta dat je u literaturi [13], [14].

3.1. Merna metoda

Nakon apsorbovanja doze X zračenja od 60 krad(Si) ispitivane su karakteristike regulacije pozitivnih 5-voltnih stabilizatora napona LM2940CT5. Ispitivanje regulacije izlaznog napona je vršeno u dvadeset pet mernih tačaka, na sledeći način: za konstantnu vrednost izlazne struje menjan je napon na ulaznom priključku integrisanog kola, i očitavana je vrednost izlaznog napona. Struje su podešavane na pet vrednosti: 0A, 100 mA, 300 mA, 500 mA i 700 mA. Za svaku vrednost struje, ulazni napon je podešavan na pet vrednosti: 6,5V, 8V, 10V, 12V, 15V. Iako ulazni napon stabilizatora napona treba da bude što niži, radi smanjenja disipacije kola, pojava viših napona ne sme da ugrozi ispravno funkcionisanje kola. Na osnovu dobijenih rezultata formirane su familije krivih regulacije izlaznog napona u funkciji napona napajanja (naponska regulacija).

Polarizovane komponente su u polju jonizujućeg zračenja dodatno ispitivane praćenjem promene izlaznog napona tokom ozračivanja. Mereno je da li se izlazni napon 5-voltnih stabilizatora napona održava u dozvoljenim granicama pri radu sa opterećenjem od 100 mA i ulaznim naponom od 7V.

Da bi se izbegao uticaj efekta rekombinacije u poluprovodniku nakon ozračivanja, sva merenja su vršena u roku od najviše dva sata nakon prestanka dejstva zračenja. Kola LM2940CT5 izlagana su dozama X zračenja od 60 krad (Si) (600 Gy(Si)). Jačinu doze

u polju X zračenja je bila 11,6 rad/s. Dominantan mehanizam jonizacije bio je Komptonov efekat.

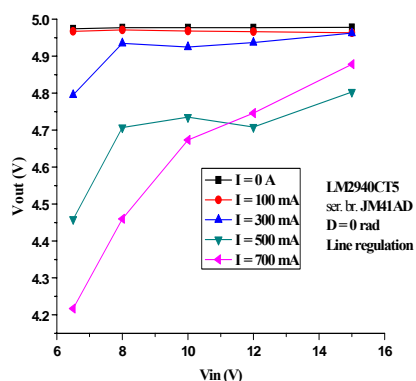
3.2. Izvor jonizujućeg zračenja i dozimetrija

Za dobijanje X zračenja, odnosno fotona energije 150 keV, korišćen je dozimetrijski generator PHILIPS MG 320. Napon i struja rentgenske cevi MC 321 su tokom eksperimenta podešeni na 300 kV, 10 mA. Volframska ploča je korišćena kao meta. Filtracija fotona je vršena aluminijumskom folijom debljine 0,47 mm.

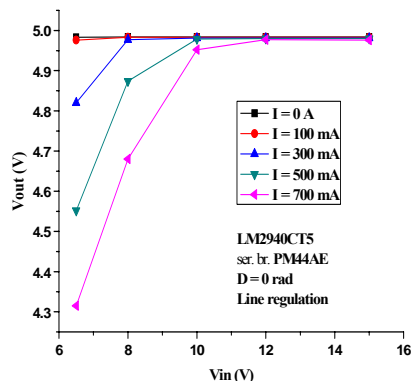
Merenje jačina ekspozicionih doza je vršeno jonizacionom komorom "Dosimentor" PTW M23361, zapremine $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$, sa greškom merenja $\pm 2\%$. Uz jonizacionu komoru korišćen je čitač DI4 [12].

4. REZULTATI

Na slikama 8 i 9 prikazane su karakteristike naponske regulacije kola LM2940CT5 bez prisustva zračenja. Na slikama 10, 11 i 12 prikazane su karakteristike regulacije kola nakon apsorbovanja doze X zračenja od 60 krad (Si). Kola čije su karakteristike prikazane na slikama 10 i 11 tokom ozračivanja nisu bila polarizovana, dok je na slici 12 prikazana zavisnost naponske regulacije za kola koja su tokom ozračivanja polarizovana strujom od 100 mA i ulaznim naponom 7V.



Slika 8. Karakteristika naponske regulacije kola LM2940CT5 pre ozračivanja (ser. br. PM44AE)



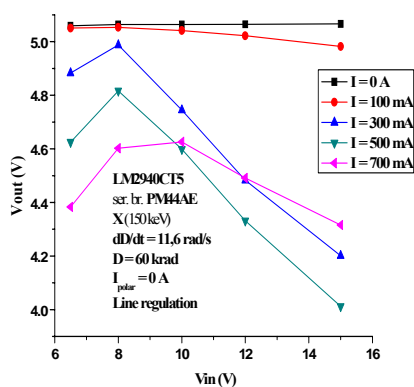
Slika 9. Karakteristika naponske regulacije kola LM2940CT5 pre ozračivanja (ser. br. JM41AD)

Na značajne razlike u kvalitetu integrisanih kola LM2940CT5 iz dve serije istog proizvođača ukazuju karakteristike regulacije pre ozračivanja. Nemogućnost da se postigne nominalni napon od 5V na izlazu stabilizatora napona serije JM41AD već pri struji od 300 mA (ugrađeni hladnjaci od 14 K/W dozvoljavaju maksimalnu disipaciju na serijskom tranzistoru od 7W) ukazuju na znatno niži koeficijent strujnog pojačanja serijskog tranzistora na svim komponentama pomenute serije. Dobre karakteristike regulacije bez struje opterećenja i pri struji od 100 mA ukazuju da osnovni problem nije u izvorima referentnog napona ili u diferencijalnom pojačavaču greške, već u nedovoljnom pojačanju kola povratne sprege.

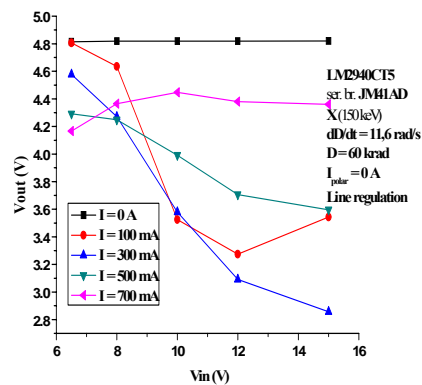
Nakon apsorbovanja doze zračenja od 60 krad(Si) kod integrisanih kola iz serije PM44AE došlo je do velike degradacije strujnog pojačanja serijskog tranzistora, posebno u uslovima ozračivanja sa polarizacijom. Takođe, pojavljuju se i problemi prilikom rada na većim naponima, kada izlazni napon pada na veoma niske vrednosti, 4V - 4,5V, i pored velike razlike ulaznog i izlaznog napona, koja bi trebalo da omogući dobru regulaciju izlaznog napona. Kada se u obzir uzmu i efekti uočeni tokom ispitivanja maksimalne struje i pada napona na rednom tranzistoru [12], uz uočenu nestabilnost karakteristika tokom merenja na većim strujama i naponima, dolazi se do zaključka da je, pored uticaja na serijski tranzistor, zračenje imalo uticaj i na degradaciju karakteristika tranzistora u kolu izvora referentnog napona i diferencijalnog pojačavača greške povratne sprege.

Na slici 11 prikazana je karakteristika regulacije nepolarizovanih kola LM2940CT5 iz serije JM41AD nakon apsorbovanja doze X zračenja od 60 krad (Si). U ovom slučaju se još više uočava degradacija karakteristika kola, koje već pri strujama od 100 mA i ulaznim naponima većim od 8V ne može da vrši svoju osnovnu funkciju 5 - voltnog stabilizatora napona, jer izlazni napon pada i ispod 3V. Nakon izlaganja kola iz serije JM41AD dozi X zračenja od 60 krad(Si), njihov izlazni napon pada ispod vrednosti od 4,9V i kada nisu opterećena, što ukazuje na značajnu degradaciju izvora referentnog napona.

Izlazni napon ispitanih stabilizatora napona veći od 4,9V može da se smatra prihvatljivim, dok je izlazni napon ispod 4,7V granica kada kolo može da se smatra potpuno neupotrebljivim za svoju osnovnu namenu, održavanje stabilnog izlaznog napona od 5V, za vrednosti ulaznog napona 6 - 26 V i struje 0 - 1 A [3]. Već pri strujama većim od 100 mA kod serije JM41AD, odnosno 300 mA kod kola iz serije PM44AE, kod kola bez polarizacije, uočava se da postaju potpuno nefunkcionalna. Pri radu sa većim strujama, odnosno 500 mA i posebno 700 mA, uočava se "oporavak" kola iz serije JM41AD (u znatno manjoj meri i stabilizatora iz serije PM44AE), kod kojih dolazi do rasta izlaznog napona.

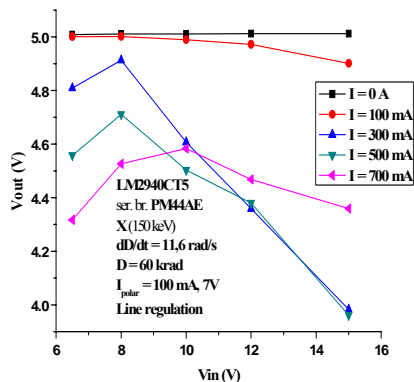


Slika 10. Karakteristika naponske regulacije kola LM2940CT5 nakon apsorbovanja doze X zračenja 60 krad (bez polarizacije) (ser. br. PM44AE)

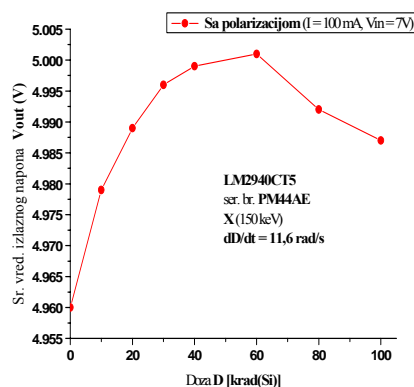


Slika 11. Karakteristika naponske regulacije kola LM2940CT5 nakon apsorbovanja doze X zračenja 60 krad (bez polarizacije) (ser. br. JM41AD)

Ovo poboljšanje karakteristika je posledica rekombinacije naelektrisanja zahvaćenih na spoju oksidu-poluprovodnik, koja se posebno intenzivira pri proticanju velike lateralne struje kroz serijski tranzistor u blizini oksida. Tokom ispitivanja je uočeno postojanje površinske rekombinacije zahvaćenih naelektrisanja i pri manjim strujama, čak i neposredno po prestanku ozračivanja, što se nepovoljno odrazilo na stabilnost izlaznog napona - što je struja opterećenja bila veća, brže je rasla vrednost izlaznog napona za iste vrednosti ulaznog napona. Zbog toga je tokom merenja vođeno računa da kolo bude što kraće u mernim tačkama, da bi izmereni rezultati bili što bliži stanju neposredno nakon prekida ozračivanja. Uočeni visok nivo rekombinacije pozitivnih spojnih naelektrisanja ("interface traps") i razlika u odzivima istog procesa u dve različite serije ukazuju na znatno niži kvalitet oksida implantiranog u seriji JM41AD. Verovatan uzrok loših karakteristika oksida je veći nivo kontaminacije primesama bora nastao prilikom dopiranja emitorske i kolektorske oblasti. Visoka koncentracija akceptorskih primesa na graničnoj površi poluprovodnika i oksida dodatno doprinosi uspostavljanju površinskih stanja i uticaju na oblast baza - emitor lateralnih tranzistora neposredno ispod sloja oksida. I veća debljina oksida u seriji (debljina pasivizacionog oksida je parametar koji najviše varira u proizvodnji komercijalnih integrisanih kola) utiče na zahvat pozitivnih naelektrisanja u oksidu, pa aditivni efekti zahvata naelektrisanja u dubini oksida i nastanka površinskih stanja mogu da dovedu do drastičnih razlika u odzivu istog tehnološkog procesa pri identičnim uslovima ispitivanja. Takođe, niska vrednost koeficijenta strujnog pojačanja stabilizatora napona serije JM41AD ukazuje i na varijacije u širini baze i nivoa dopiranja u fazi proizvodnje poluprovodnika ("wafer") od kojih su kasnije formirana integrisana kola iz iste serije.



Slika 12. Karakteristika naponske regulacije kola LM2940CT5 nakon apsorbovanja doze X zračenja 60 krad (sa polarizacijom) (ser. br. PM44AE)



Slika 13. Promena izlaznog napona polarizovanog stabilizatora napona LM2940CT5 za vreme izlaganja uticaju X zračenja (ser. br. PM44AE)

Na slici 12 su prikazane zavisnosti naponske regulacije za kola LM2940CT5, serija PM44AE, koja su tokom ozračivanja polarizovana strujom od 100 mA i ulaznim naponom 7V. Komponente iz serije JM41AD nisu ispitivane u polju X zračenja sa polarizacijom. Uočava se da je zajednički uticaj zračenja i polarizacije doveo do nešto veće degradacije strujnog pojačanja lateralnog serijskog tranzistora, prvenstveno zbog

malog strujnog pojačanja serijskog tranzistora iz serije JM41AD. Prilikom rada tranzistora sa polarizacijom dolazi do rekombinacije površinskih zahvata sa elektronima iz lateralnog toka struje kroz bazu tranzistora, pa na karakteristike spoja baza - emitor serijskog tranzistora dominantno utiču zahvaćena pozitivna naelektrisanja u oksidu. Nepostojanje spojnih zahvata dovodi do smanjenja nivoa rekombinacije u emitoru (aditivan efekat sa zahvatom naelektrisanja u oksidu iznad oblasti emitora), pa bi se moglo očekivati da degradacija karakteristika lateralnog PNP tranzistora pri proticanju struje bude manja u odnosu na slučaj bez polarizacije. Međutim, postojanje ulaznog napona od 7V prilikom ozračivanja dovodi do direktne polarizacije spoja baza - emitor, izazivajući injekciju naelektrisanja iz emitora u bazu i, posledično, porast struje baze. Zbog toga je degradacija karakteristika lateralnog PNP tranzistora izrađenog primenom BiFET procesa nešto veća u odnosu na slučaj bez postojanja polarizacije, ali svakako manja nego što bi to bio slučaj da je polarizacija serijskog tranzistora vršena bez proticanja struje. Integrisana kola iz serije JM41AD su nakon apsorbovanja doze X zračenja od 60 krad(Si) postala potpuno neupotrebljiva čak i za rad sa strujama opterećenja od 100 mA, dok je kod komponenata iz serije PM44AE struja opterećenja od 300 mA bila previsoka za ispravno funkcionisanje, iako su stabilizatori napona LM2940CT5 deklarirani za rad sa strujama opterećenja do 1A.

Upoređivanje navedenih rezultata sa podacima sa slike 13, koja predstavlja praćenje promena izlaznog napona polarizovanog stabilizatora napona iz serije PM44AE tokom ozračivanja u polju rentgenskog zračenja do apsorbovanja doze od 100 krad(Si), ukazuje da bi se samo praćenjem promena izlaznog napona došlo do potpuno pogrešnih zaključaka o radijacionoj otpornosti BiFET procesa. Naime, iako je izlazni napon ostao u prihvatljivim granicama u uslovima izlaganja kola širokom opsegu doza jonizujućeg zračenja, karakteristike regulacije ukazuju na potpunu degradaciju i neupotrebljivost komponenata nakon apsorbovanja doza zakročnog zračenja od 60 krad(Si). Ni kod jednog ispitivanog kola nije došlo do trajnog funkcionalnog otkaza ili proboja serijskog tranzistora.

5. ZAKLJUČAK

Ispitivanje integrisanog kola izrađenog primenom "Simplified BiFET" procesa u kompletnom opsegu radnih struja i napona nakon izlaganja uticaju X zračenja ukazalo je na nizak nivo radijacione otpornosti analiziranog procesa. Osnovni uzroci niske otpornosti na uticaj jonizujućeg zračenja su primena lateralnih PNP tranzistora, velika debljina i kontaminiranost primesama pasivizacionog izolacionog oksida, kao i velike varijacije u karakteristikama oksida, geometrije tranzistora i koeficijenta strujnog pojačanja serijskih tranzistora između komponenata različitih serija proizvedenih primenom istog tehnološkog postupka. Visok nivo rekombinacije zahvaćenih naelektrisanja u oksidu sa elektronima koji protiču kroz serijski tranzistor prilikom snimanja karakteristika naponske regulacije ukazuju na visok faktor dielektričnih gubitaka izolacionog oksida, kao i primarni uticaj površinskih stanja na degradaciju koeficijenta strujnog pojačanja serijskog lateralnog PNP tranzistora. Veliki broj paralelno vezanih tranzistora (350) nije uticao na povećanje redijacione otpornosti stabilizatora napona, kao ni korišćenje slabo dopiranih pasivizacionih slojeva poluprovodnika implantiranih primesama arsena (As). Proticanje struje i rekombinacija zahvaćenih naelektrisanja na spoju Si/SiO₂ nisu značajno doprineli smanjenju degradacije pojačanja serijskog tranzistora zbog negativnog uticaja napona direktne polarizacije na spoju baza - emitor. Pored gubitka pojačanja serijskog tranzistora,

odnosno pada ukupnog pojačanja petlje negativne povratne sprege stabilizatora napona, uočena je i degradacija karakteristika izvora referentnog napona i , u manjoj meri, diferencijalnog pojačavača greške.

Navedeni razlozi navode na zaključak da treba izbegavati primenu kola izrađenih primenom "Simplified BiFET" procesa sa lateralnim PNP tranzistorima u svim uslovima gde se očekuje uticaj jonizujućeg zračenja. Praćenje samo pojedinih parametara integrisanog kola, bez ispitivanja kola u kompletnom opsegu radnih karakteristika, predstavlja postupak koji je jednostavan i kratkotrajan, ali koji može da dovede do pogrešnih zaključaka o radijacionoj otpornosti ispitivanih komponenata.

LITERATURA

- [1] W.N. Khader, J. T. Wang, B. E. Hollins, Simplified BiFET Process, *United States Patent 4512815*, Apr. 23, 1985.
- [2] J. R. Murkland, J. S. Congdon, Lateral PNP Power Transistor, *United States Patent 4417265*, Nov. 22, 1983.
- [3] LM2940 1A Low Dropout Voltage Regulator, National Semiconductor, 2003.
- [4] J. L. Dunkley, R. C. Dobkin, Semiconductor Device with an Ion Implanted Stabilization Layer, *United States Patent 4496963*, Jan. 29, 1985.
- [5] S.L. Kosier, W.E. Combs, A. Weit, R.D. Schrimpf, D.M. Fleetwood, M. Debus, R.L. Pease, "Bounding the Total-Dose Response of Modern Bipolar Transistors", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 41 (1994) 1864- 1870.
- [6] G.C. Messenger, M.S. Ash, *The Effects of Radiation on Electronic Systems*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- [7] D.M. Schmidt, et al, "Comparison of Ionizing-Radiation-Induced Gain Degradation in Lateral, Substrate and Vertical PNP BJTs ", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 42 (1995) 1541-1549.
- [8] R. D. Schrimpf, "Recent Advances in Understanding Total-Dose Effects in Bipolar Transistors ", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 43 (1996) 787- 796.
- [9] D.M. Schmidt, et al, "Modeling Ionizing Radiation Induced Gain Degradation of the Lateral PNP Bipolar Junction Transistor", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 43 (1996) 3032-3039.
- [10] A. Wu, et al, "Radiation-Induced Gain Degradation in Lateral PNP BJTs with Lightly and Heavily Doped Emitters", *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44 (1997) 1914-1921.
- [11] S. Krishna, A.R. Ramde, Integrated Circuit Lateral Transistor Structure, United States Patent 4804634, Feb. 14, 1989.
- [12] V. Vukić, P. Osmokrović, S. 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, 19.-23. septembar 2005.
- [13] V. Vukić, "Uticaj jonizujućeg zračenja na karakteristike linearnih stabilizatora napona ", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla"* 17 (2005) 31-44.

- [14] V. Vukić, P. Osmokrović, "Total Ionizing Dose Response of Commercial Process for Synthesis of Linear Bipolar Integrated Circuits ", *J. Optoelect. Adv. Mat.* 8 (2006) 1538-1544.

Abstract: The standard process for manufacture of integrated circuits comprised of bipolar and JFET transistors was an object of examinations in X radiation field. Positive voltage regulator LM2940CT5 had been chosen as a representative of "BiFET" process for examination of characteristics. The mentioned integrated circuit contains a control device, as well as the power transistor, comprised of 350 elementary lateral PNP transistors. The device examinations were performed by recording the line regulation characteristics and changes of output voltage. Though the output voltage remained in acceptable limits even after the absorption of higher X radiation doses, line regulation characteristics indicated complete device's functional failure after total ionizing dose 60 krad(Si). The basic mechanisms of "BiFET" process degradation were identified.

Key words: *BiFET process, integrated circuit, lateral PNP transistor, line regulation, oxide traps, interface traps, X radiation*

THE X RAY RADIATION RESPONSE OF INTEGRATED CIRCUIT MADE BY "BiFET" PROCESS

Vladimir Vukić