

UTICAJ X I γ ZRAČENJA I USLOVA POLARIZACIJE NA PAD NAPONA NA SERIJSKOM TRANZISTORU STABILIZATORA NAPONA

Vladimir Vukić,¹ Predrag Osmokrović,² Srboljub Stanković,³ Milojko Kovačević³
¹Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", ²Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
³Institut za nuklearne nauke "Vinča"

Sadržaj - Predmet istraživanja prikazanog u radu je degradacija karakteristika serijskog tranzistora stabilizatora napona sa niskim padom napona prilikom izlaganja kola jonizujućem zračenju. Stabilizatori napona su izlagani dejstvu X i γ zračenja u dva režima: bez polarizacije, i sa polarizacijom i opterećenjem. Ispitivana su kola koja su predstavnici prve i druge generacije stabilizatora sa niskim padom napona, sa lateralnim i vertikalnim serijskim PNP tranzistorom: LM2940 i L4940. Predstavljeni su rezultati ispitivanja promene izlaznog napona i pada napona na serijskom tranzistoru u funkciji ukupne apsorbirane doze, pri izlaganju zračenju srednje jačine doze.

1. UVOD

Karakteristike savremenih mikroprocesora i pratećih integrisanih kola postavljaju složene zahteve za projektovanje napajanja ovih sistema u svim uslovima eksploatacije. Zahtevi za stabilnošću rada u širokom opsegu temperatura, podnošenje pojave velikih ulaznih tranzijenata bez većeg uticaja na izlazni napon, kao i smanjenje disipacije na serijskom tranzistoru, u najvećem broju slučajeva isključuju mogućnost korišćenja starijih integrisanih stabilizatora napona sa serijskim NPN Darlington-tranzistorom, poput familije kola MC78XX, i kao rešenje nameću upotrebu stabilizatora sa niskim padom napona (Low Dropout Voltage Regulator). Međutim, u sistemima koji moraju da funkcionišu u uslovima povišenog jonizujućeg zračenja, poput elektronskih sklopova u vojnim taktičkim i strategijskim sistemima, nuklearnim reaktorima, akceleratorima, satelitskoj tehnici, dodatni zahtev koji moraju da ispune elektronske komponente je radijaciona otpornost.

Uticaj jonizujućeg zračenja na linearne stabilizatore napona bio je predmet istraživanja [1]. U ovom slučaju su bile ispitivane karakteristike rada u svemirskom okruženju, gde je dominantan uticaj produženog dejstva malih jačina doze (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS) [2]. Testovi su vršeni u polju γ zračenja, sa izvorom ⁶⁰Co, uz primenu velikih jačina doze (50 - 300 cGy/s), kao i malih jačina doze (0,01 - 0,1 cGy/s). Takođe, ispitivane su mnoge, sada već zastarele, komercijalne komponente, koje, po pravilu nisu ispunile zahteve za eksploataciju u radijacionom okruženju.

Predmet istraživanja predstavljenog u ovom radu je ispitivanje predstavnika dve generacije stabilizatora sa niskim padom napona na uticaj srednjih doza jonizujućeg zračenja, pri izlaganju X i γ zračenju, odnosno fotonima srednje i visoke energije. Ispitivan je pad napona na serijskom naponu i degradacija izlaznog napona, bez polarizacije kola i uz postojanje ulaznog napona i struje potrošača.

2. TEORIJA

U zavisnosti od energije fotona, γ i X zračenje vrše tri vrste uticaja na materijal: fotoelektrični efekat (energije reda keV), Komptonov efekat (reda 100 keV - 1 MeV) i generisanje elektronsko-pozitronskog para (preko 1,024 MeV) [3]. Oštećenja izazvana uticajem jonizujućeg zračenja na bipolarni tranzistor, kao osnovni element linearnih stabilizatora napona, prvenstveno se ogledaju u raskidanju hemijskih veza u kristalnoj rešetki molekula, odnosno zahvatu naelektrisanja na površinama izolacionih oksida (SiO₂), ili u unutrašnjosti oksida [3]. Zahvaćena naelektrisanja formiraju oblasti inverznih naelektrisanja, što povećava generaciono - rekombinacione struje, čime se skraćuje vreme života manjinskih nosilaca. Makroskopska posledica ovog efekta je smanjenje strujnog pojačanja tranzistora, kao i struja curenja na spoju baza - emitor. Za direktno polarisan spoj baza - emitor NPN tranzistora važe sledeće relacije [4]:

a) Pre zračenja:

$$\beta_0 = \frac{I_C}{I_{b1}} \quad (1)$$

gde je: I_C - struja kolektora, I_{b1} - struja šupljina prešlih iz baze u emitor;

b) Posle zračenja:

$$\beta = \frac{I_C}{I_{b1} + I_{b2}} < \beta_0 \quad (2)$$

gde je I_{b2} - rekombinaciona struja dela elektrona prešlih iz emitora u bazu.

Nakon zračenja dolazi do formiranja rekombinacionih centara u bazi tranzistora, kao i u sloju oksida između kontakata baze i emitora. Kako je pokretljivost šupljina znatno manja od pokretljivosti elektrona, one se sporije rekombinuju od zahvaćenih elektrona, i na površini oksida se formira ekvivalentno pozitivno naelektrisanje, koje teži da se rekombinuje sa elektronima u silicijumu. Kako je pokretljivost nosilaca naelektrisanja u dielektriku (SiO₂) nekoliko desetina puta manja u odnosu na poluprovodnik (Si), proces rekombinacije traje veoma dugo, i posledica je dejstva jonizujućeg zračenja na tranzistor. Pošto se sa porastom temperature povećava pokretljivost nosilaca naelektrisanja u poluprovodniku, izlaganje integrisanog kola povišenoj temperaturi nakon prestanka zračenja može da ubrza proces oporavka, odnosno rekombinacije [3].

Dominantan uticaj jonizujućeg zračenja na koeficijent strujnog pojačanja β kod bipolarnih tranzistora ostvaruje se preko mehanizma površinske rekombinacije [3]. Za razliku od teških čestica (neutroni, protoni, joni), koji dominantan uticaj na integrisano kolo ostvaruju u dubini supstrata, fotoni jonizujućeg zračenja dominantan efekat imaju na površini poluprovodnika. Zbog toga je uticaj γ i X zračenja znatno

više izražen kod lateralnih tranzistore, kod kojih struja teče neposredno ispod sloja oksida, u odnosu na vertikalne, kod kojih struja teče kroz supstrat. Zbog manjeg strujnog pojačanja ($\beta = 5 - 10$) i niže radne frekvencije (f_T), PNP tranzistori su mnogo osetljiviji na dejstvo zračenja od NPN tranzistora. Današnja bipolarna integrisana kola se pretežno prave pomoću tehnologije spojnog izolovanja tranzistora (JI - junction-isolated), sa inverzno polarisanim PN spojem, formiranim sa supstratom, kao izolacijom. Drugi postupak, dielektrično izolovanje (DI - dielectrically-isolated) se zasniva na odvajanju svih komponenta izolatorom (obično SiO₂). Ovaj postupak daje integrisanim kolima mnogo veću otpornost na uticaj zračenja, ali je znatno skuplji. Odavde se uočava da je kritičan element za funkcionisanje linearnih bipolarnih integrisanih kola u radijacionom okruženju lateralni PNP tranzistor. Kako je korišćenje PNP tranzistora kao serijskog tranzistora kod stabilizatora napona sa niskim padom napona ključni element dizajna, očekivan je presudan uticaj konstrukcije integrisanog kola na njegovu radijacionu otpornost.

Low-dropout stabilizatori napona prve generacije, poput kola LM2940, imali su lateralne serijske PNP tranzistore [5]. Tehnološka realizacija ovakvog rešenja je znatno jednostavnija, a za stabilan rad kola je potreban veći izlazni elektrolitski kondenzator. Kolo druge generacije predstavlja stabilizator L4940, koji ima vertikalni PNP serijski tranzistor [5]. Namera konstruktora (ST Microelectronics), kako se implicitno može zaključiti, nije bila da uvođenjem ICV PNP tehnologije (Isolated Collector Vertical PNP) konstruiše radijaciono ojačano kolo, već postizanje manjeg pada napona na serijskom tranzistoru, manje struje curenja kolektor - emitor i veće stabilnosti tokom rada. Cilj eksperimenta je bio utvrđivanje razlike u otpornosti dve generacije stabilizatora napona na uticaj dve vrste jonizujućeg zračenja, odnosno uticaj γ i X zračenja na dve različite tehnologije za konstruisanje bipolarnih integrisanih kola.

3. EKSPERIMENT

Integrisani stabilizatori napona ST Microelectronics L4940V5 i National semiconductor LM2940CT5 su ispitivani u Metrološko - dozimetrijskoj laboratoriji Instituta za nuklearne nauke "Vinča". Po dvadeset integrisanih kola je podeljeno u četiri grupe - po pet kola je ispitivano u poljima γ i X zračenja, bez polarizacije. Naredne dve grupe od po pet stabilizatora napona su ispitivane 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.

A. Izvori jonizujućeg zračenja

Kao izvor γ zračenja korišćen je ⁶⁰Co, smešten u uređaju za realizaciju γ -polja IRPIK-B. Aktivnost izvora ⁶⁰Co 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. Usvojeno je da je srednja energija γ -fotona $E_\gamma = 1,25$ MeV. Uzorci su izlagani zračenju u čeljusti kolimatora.

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. Filtracija je vršena aluminijumskom folijom debljine 0,47 mm.

Merenje jačina ekspoziционих doza je vršeno jonizacionom komorom Dosimentor PTW M23361, zapremine $3 \cdot 10^{-5}$ m³, sa greškom merenja $\pm 2\%$. Uz jonizacionu komoru korišćen je čitač DI4.

B. Električna ispitivanja

Uzorci stabilizatora napona su zračeni u grupama od po dva kola, gde je po jedno bilo L4940 i LM2940. Kola su napajana preko kablova dužine 10 metara, ukupne otpornosti 0,4 Ω . Da bi se očuvala stabilnost rada, na krajevima kabla, odnosno ulaznim kontaktima kola montirani su aluminijumski elektrolitski kondenzatori kapacitivnosti 33 μ 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 integrisanih kola (plastična, TO-220) montirani su aluminijumski hladnjaci toplotne otpornosti 14 K/W, čime je omogućeno ispitivanje stabilizatora sa disipacijama do 7W. 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 integrisanih 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%. Sva merenja, kao i zračenje komponentata, vršena su na sobnoj temperaturi od 19°C.

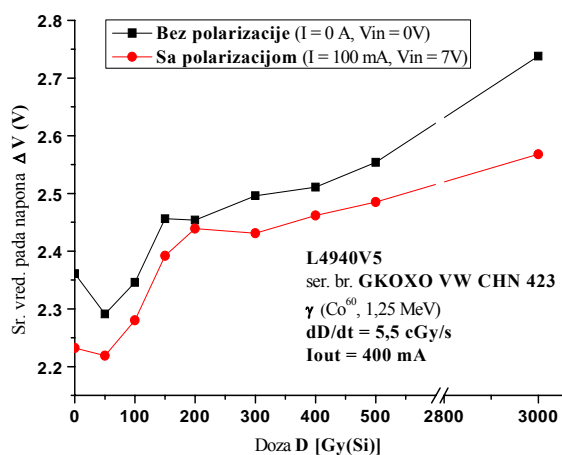
C. Merna metoda

Makroskopska veličina kojom je detektovana degradacija stabilizatora napona usled jonizujućeg zračenja je pad napona na serijskom tranzistoru. Ispitivanje je vršeno na sledeći način: ulazni napon je podizan dok vrednost izlaznog napona ne dostigne 4,9V, pri izlaznoj struji od 400 mA. Razlika ulaznog i izlaznog napona predstavlja vrednost pada napona na serijskom tranzistoru za datu struju. Zbog gubitka strujnog pojačanja tranzistora usled izlaganja jonizujućem zračenju, vrednost izlaznog napona je padala i ispod 4,9V, tako da je za formiranje potpune slike o funkcionalnosti kola nakon ozračivanja potrebna i informacija o promeni maksimalnog izlaznog napona u funkciji ukupne jonizacione doze.

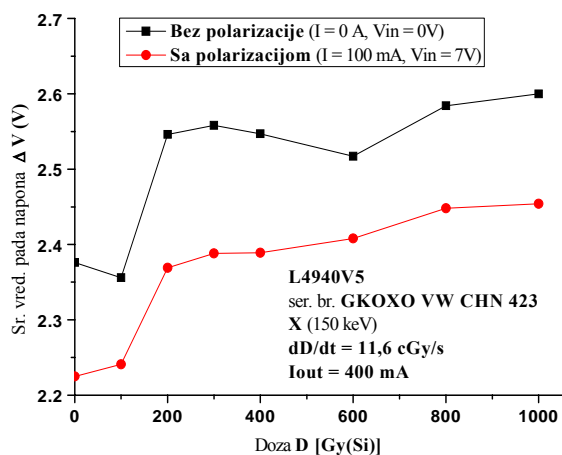
Kola su ozračivana do određenih vrednosti doza, nakon čega je prekidano ozračivanje, i ispitivane su sve četiri grupe kola. Da bi se izbegao uticaj efekta rekombinacije u poluprovodniku nakon ozračivanja, sva merenja su vršena u roku od najviše dva sata nakon prestanka dejstva zračenja. Nakon ispitivanja električnih karakteristika kola za određenu apsorbovanu dozu, nastavljalo se dalje ozračivanje komponentata. Kola u polju γ zračenja izlagana su ukupnoj dozi od 3 kGy(Si), uz jačinu doze od 5,5 cGy/s, dok su komponente u polju X zračenja apsorbovale dozu od 1 kGy (Si), uz jačinu doze 11,6 cGy/s. Stabilizatori u polju γ zračenja su apsorbovali dozu od 500 Gy tokom dana, dok su noću ostavljani u polju zračenja do apsorbovanja doze od 3 kGy. I u ovom slučaju su, da bi se izbegao efekat rekombinacije, merenja vršena do dva sata nakon prestanka zračenja.

4. REZULTATI

Na slici 1 prikazana je promena srednje vrednosti pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona L4940V5 u zavisnosti od ukupne apsorbovane doze γ zračenja. Razlika u početnim vrednostima pada napona, pri apsorbovanoj dozi od 0 Gy, potiče od razlika u vrednosti ovog parametra kod uzoraka koji su bili ispitivani, i za koje je izračunata srednja vrednost. Uočava se stabilnost karakteristika kola, i funkcionalnost kola pri veoma visokim dozama. Prikazana odstupanja pada napona na serijskom tranzistoru su prihvatljiva, i ne pogoršavaju drastično karakteristike kola. Nijedno od pet 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. Uočava se nešto veća osetljivost nepolarizovanih kola na dejstvo zračenja nakon apsorbovanja veće doze.



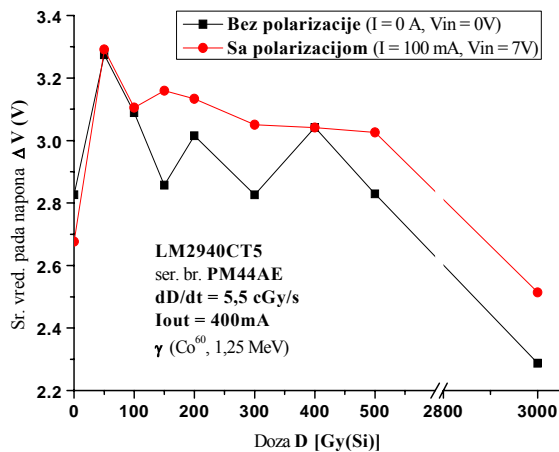
Slika 1. Promena pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona L4940V5 pod dejstvom γ zračenja



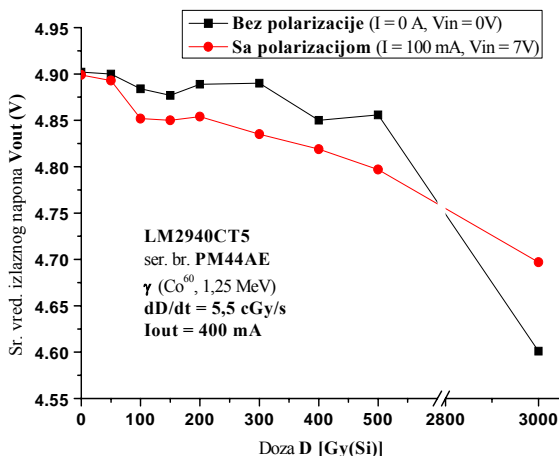
Slika 2. Promena pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona L4940V5 pod dejstvom X zračenja

Na slici 2 je prikazan uticaj X zračenja na pad napona na serijskom tranzistoru kola L4940V5. Kao i u prethodnom slučaju, pomeraj između krivih u tački $D = 0$ Gy posledica je izbora uzoraka u grupi. Slično kao kod dejstva visokoenergetskih fotona γ zračenja, i uticaj fotona srednjih

energija X zračenja, većeg koeficijenta incidencije, ne utiče na funkcionalnost kola na ispitivanim dozama. Primećuje se efekat malih doza (do 200 Gy), kada dolazi do nešto značajnijeg pada napona na serijskom tranzistoru, dok se na većim dozama uočava mali rast. I u ovom slučaju izlazni napon nije pao ispod 4,9V, i ni kod jednog kola nije došlo do proboja.



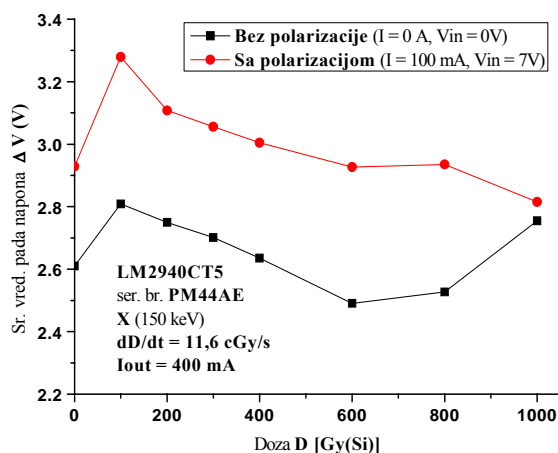
Slika 3. Promena pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona LM2940CT5 pod dejstvom γ zračenja



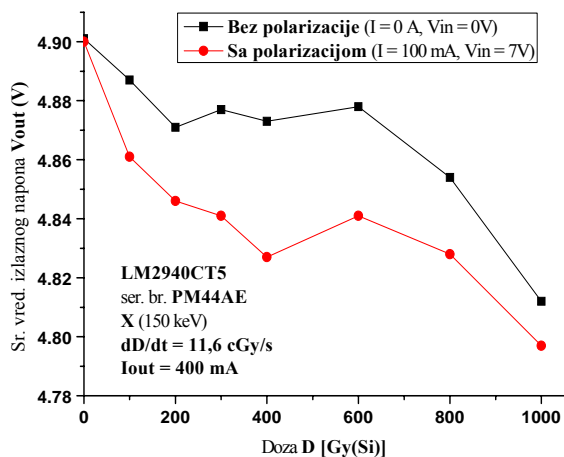
Slika 4. Promena maksimalnog izlaznog napona na stabilizatoru napona LM2940CT5 pod dejstvom γ zračenja

Na slikama 3 i 4 prikazan je uticaj γ zračenja na pad napona na serijskom tranzistoru i maksimalan izlazni napon kola LM2940CT5 u funkciji apsorbovane doze. Uočava se da već nakon apsorbovanja doze od 50 Gy (Si) stabilizator ne može da obezbedi izlazni napon od 4,9V, što je manifestacija degradacije strujnog pojačanja tranzistora. Takođe, uočena je nestabilnost izlaznog napona prilikom merenja - tokom izlaganja kola jačem električnom polju (veći ulazni napon i struja) dolazilo je do rasta vrednosti izlaznog napona. Ovo je posledica rekombinacionih procesa - uočeno je da je rekombinacija više izražena pri većim vrednostima napona i struje. Zbog toga su uzorci tokom merenja držani što kraće na višim naponima i strujama. Kao i kod kola L4940V5, uočena je veća osetljivost nepolarizovanih kola na velike apsorbovane doze zračenja. Međutim, na manjim dozama

nepolarizovana integrisana kola imaju nešto bolje karakteristike.



Slika 5. Promena pada napona na serijskom tranzistoru stabilizatora napona LM2940CT5 pod dejstvom X zračenja



Slika 6. Promena maksimalnog izlaznog napona na stabilizatoru napona LM2940CT5 pod dejstvom X zračenja

Na slikama 5 i 6 prikazan je uticaj X zračenja na pad napona na serijskom tranzistoru i maksimalan izlazni napon kola LM2940CT5. I pri dejstvu X zračenja postoji trend izraženijeg pogoršanja karakteristika tokom izlaganja zračenju kola sa polarizacijom u odnosu na nepolarizovana kola na malim dozama. Uočava se tačka 800 Gy, kada se trend menja - nepolarizovana kola postaju osetljivija na dejstvo ukupne apsorbovane doze. Efekat zasićenja je uočen na struji od 400 mA i ulaznim naponima 7 - 8 V, pa se postavlja pitanje pada napona u celom opsegu rada kola ($V_{in} = 26V$, $I_{out} = 1A$), čime se dovodi u pitanje mogućnost regulacije opterećenja u celom opsegu ulaznih napona.

5. ZAKLJUČAK

Predstavljeni rezultati ukazuju na znatno veću osetljivost na uticaj γ i X zračenja na stabilizatore napona sa lateralnim serijskim PNP tranzistorom u odnosu na kola sa vertikalnim PNP tranzistorom. Efekat zračenja se u oba slučaja ogleda u porastu pada napona na serijskom tranzistoru, koji je znatno izraženiji na lateralnim tranzistorima. Ni na jednom

stabilizatoru L4940V5 nije uočeno zasićenje izlaznog napona pri struji od 400 mA, dok je na svim stabilizatorima LM2940CT5 maksimalna vrednost izlaznog napona pala ispod 4,9V. Na manjim dozama je kod kola LM2940CT5 uočena veća degradacija karakteristika polarizovanih kola, dok su na većim dozama karakteristike nepolarizovanih kola bile lošije. Kod kola L4940V5 nisu uočene bitnije razlike u uticaju polarizacije, kao i tipa zračenja na karakteristike kola. Jedino je na vrlo visokim dozama γ izračenja (300 krad (Si)) uočena nešto veća degradacija karakteristika na nepolarizovanim kolima. Efekti dejstva γ zračenja i X zračenja na pad napona na serijskim tranzistorima kola LM2940CT5 i L4940V5 se nisu bitnije razlikovali. Nisu uočeni efekti dejstva jonizujućeg zračenja koji bi uticali na pad kapacitivnosti kondenzatora montiranih na ulaznim kontaktima ozračivanih stabilizatora napona. Na osnovu dobijenih rezultata se može izvesti zaključak da su stabilizatori napona L4940V5, sa vertikalnim PNP tranzistorima, pogodni za primenu u radijacionom okruženju, dok kola LM2940CT5, sa lateralnim PNP tranzistorima, nemaju dovoljnu radijacionu otpornost.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Feliciano Giustino, "Radiation Effects on Semiconductor Devices - Study of the Enhanced Low Dose Rate Degradation", PhD Thesis, Politecnico Di Torino, 2001.
- [3] George C. Messenger, Milton S. Ash, "The Effects of Radiation on Electronic Systems", Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
- [4] Martin Dentan, "Radiation Effects on Electronic Components and Circuits", European Organization for Nuclear Research CERN Training, 2000.
- [5] Paolo Antoniazzi, Arturo Wolfsgruber, "Very Low Dropout Regulators Enhance Supply Performance", SGS-Thomson Microelectronics, 1995.

Abstract - Research topic presented in this paper is degradation of characteristics of low-dropout voltage regulator's serial transistor during exposure of device to the ionizing radiation. Voltage regulators were exposed to X and γ radiation in two modes: without bias conditions, and with bias conditions and load. Tested circuits are representatives of the first and the second generation of low-dropout voltage regulators, with lateral and vertical PNP serial transistor: LM2940 and L4940. Experimental results of output voltage and serial dropout voltage change in function of total ionizing dose, during the medium-dose-rate exposure, were presented.

INFLUENCE OF X AND GAMMA RADIATION AND BIAS CONDITIONS ON DROPOUT VOLTAGE OF VOLTAGE REGULATORS' SERIAL TRANSISTOR

Vladimir Vukić, Predrag Osmokrović, Srboljub Stanković, Miloško Kovačević