

# Efekti zračenja i odžarivanja kod naponsko temperaturno naprezanih p-kanalnih VDMOS tranzistora snage

Sandra Veljković, *Student Member, IEEE*, Nikola Mitrović, *Student Member, IEEE*, Snežana Đorić-Veljković, *Member, IEEE*, Vojkan Davidović, *Member, IEEE*, Snežana Golubović, *Member, IEEE*, Danijel Danković, *Member, IEEE*

**Sadržaj** — U radu su prikazani efekti zračenja i odžarivanja kod p-kanalnih VDMOS (vertical double-diffused metal-oxide semiconductor) tranzistora snage koji su prethodno bili izloženi naponsko temperaturno naprezanju tokom različitih unapred tačno utvrđenih vremenskih perioda. Ovaj eksperiment je sproveden kako bi se ispitali efekti naprezanja zračenjem kod komponenata koje su prethodno bile izložene drugim uticajima, odnosno naprezanjima. Primećeno je da je promena napona praga tokom ozračivanja malo više izražena kod komponenata koje su bile izložene naponsko temperaturno naprezanju negativnom polarizacijom gejta nedelju dana, što može biti od značaja u slučaju kada su komponente primile visoke ukupne doze. Pored toga, primećeno je da kod komponenata koje su naponski temperaturno naprezane jedan sat, a zatim ozračene do 90 Gy pri pozitivnoj polarizaciji gejta, termički aktivirani procesi tokom odžarivanja nisu dovoljni da se napon praga smanji na vrednost pre naponsko temperaturnih naprezanja, što bi moglo biti od interesa u slučaju kada komponente rade u pooštrenim uslovima.

**Ključne reči** — VDMOS tranzistor snage; napon praga; NBT (negative bias temperature) nestabilnosti; ozračivanje; odžarivanje.

## I. UVOD

Zbog svojih specifičnih performansi VDMOS (vertical double-diffused metal-oxide semiconductor) tranzistori snage imaju široku primenu kako u komercijalnim, tako i u uređajima specijalne namene (u prekidačkim izvorima napajanja, u audio pojačavačima, u automobilske industriji u uređajima i sistemima koji predstavljaju i dodatnu i primarnu opremu [1-3]). Pri tome, u nekim aplikacijama mogu biti podvrgnuti i pooštrenim uslovima rada i/ili nekom od oblika naprezanja, tako da u poslednjih dvadeset godina postoji povećano interesovanje za istraživanje njihove pouzdanosti, kao i efekata koji se javljaju pri radu u određenim uslovima [2-20]. Istraživanja su bila usredsređena uglavnom na efekte

koji se javljaju pri izlaganju visokim vrednostima električnog polja [4-6], pri ozračivanju [2, 7-9], kao i pri ispitivanju efekata ubrzanih visokom temperaturom [10-12] i efekata naponsko temperaturnih naprezanja [4, 13-19].

VDMOS tranzistori snage su veoma osetljivi na jonizujuće zračenje koje ozbiljno degradira napon praga ( $V_T$ ) [2, 7-9], tako da je za primenu u radijacionom okruženju, postupak provere pouzdanosti važan za odabir visoko pouzdanih komponenata. Standardno ispitivanje pouzdanosti za ove komponente uključuje „burn-in“ testove, pri kojima se primenjuju polarizacija i povišena temperatura [10-12, 21, 22].

Naponsko temperaturne nestabilnosti koje nastaju usled negativne polarizacije gejta i povišene temperature (u literaturi poznate kao NBTI - negative bias temperature instability), su nestabilnosti koje kod p-kanalnog MOSFET-a dovode do degradacije veoma bitnih električnih parametara, od kojih je najkritičniji napon praga. Ove nestabilnosti se javljaju kao rezultat rada uređaja na povišenoj temperaturi (obično 100-250 °C) i sa negativnom polarizacijom gejta (pri električnom polju u oksidu gejta u opsegu 2-6 MV/cm) [13, 16, 23-25]. Iako se ovi uslovi mogu javiti pri sprovođenju testova [10, 11], mogu da se jave i u nekim primenama pri standardnom režimu rada VDMOS tranzistora snage [13]. Štaviše, ove komponente mogu biti izložene istovremeno i zračenju i NBT naprezanju, kao što je navedeno u [26-29]. Takođe, u nekim primenama je moguća kombinacija sa drugim vrstama naprezanja, poput izlaganja magnetnom polju [18-20] ili uslovima visoke temperature i vlažnosti [10].

Promena napona praga IRF9520 p-kanalnih VDMOS tranzistora snage izazvana NBT naprezanjem (koja se aktivno proučava već više godina [13, 16, 30-32]) se menja po dobro poznatom  $t^n$  zakonu. Pri tome se ova zavisnost može da podeli na tri faze u zavisnosti od vrednosti parametra  $n$ . Vremena koja odgovaraju kraju prve faze (1 sat) i druge faze (1 nedelja, tj. 168 sati) izabrana su kao periodi u toku kojih je naprezanje negativnom polarizacijom gejta primenjeno u eksperimentima čiji su rezultati analizirani u ovom radu.

U ovom radu prikazani su rezultati ozračivanja IRF9520 p-kanalnih VDMOS tranzistora snage, koji su prethodno naponski temperaturno naprezani negativnom polarizacijom gejta (NTNPN) 1 sat i 168 sati, sa ciljem da se pojašni efekat trajanja naprezanja negativnom polarizacijom gejta na kasnije efekte zračenja i odžarivanja. Na osnovu podataka o apsorbovanoj dozi pri tipičnoj primeni MOS komponenata u komunikacionim satelitima [33], izabrana je granica ukupne doze od 100 Gy ( $\text{SiO}_2$ ).

Sandra Veljković – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: sandra.veljkovic@elfak.rs).

Nikola Mitrović – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: nikola.i.mitrovic@elfak.ni.ac.rs).

Snežana Đorić-Veljković – Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: snezana.djoric.veljkovic@elfak.ni.ac.rs).

Vojkan Davidović – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: vojkan.davidovic@elfak.ni.ac.rs).

Snežana Golubović – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: snezana.golubovic@elfak.ni.ac.rs).

Danijel Danković – Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: danijel.dankovic@elfak.ni.ac.rs).

## II. EKSPERIMENT

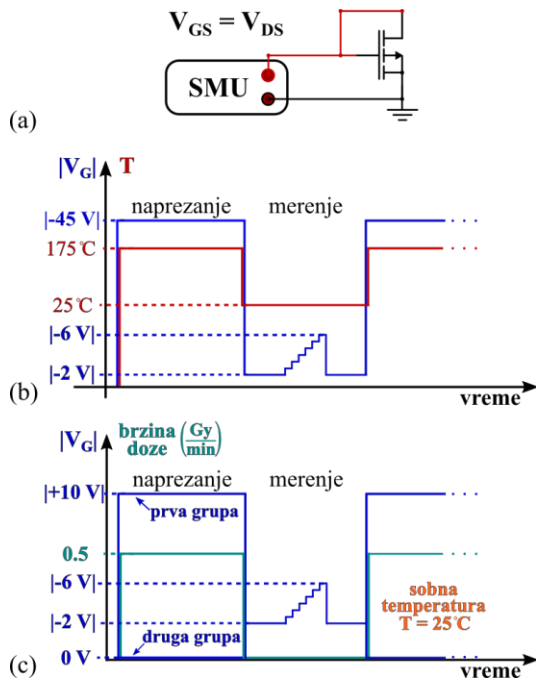
Uzorci koji su testirani u eksperimentu su komercijalni, p-kanalni VDMOS tranzistori snage tipa IRF9520. Eksperimentalna procedura se sastojala od primene NTNNP, izlaganja  $\gamma$ -zračenju i termičkog odžarivanja, koji su međusobno bili odvojeni dvema fazama spontanog oporavka.

Primena NTNNP na komponente je obavljena u Heraeus HEP2 komorama za testiranje pouzdanosti, koje su obezbeđivale stabilnu temperaturu od 175°C tokom 168 sati za prvu grupu uzoraka i 1 sat za drugu grupu uzoraka. Kod svih komponentata sors i drejn su bili uzemljeni, dok je primenjena polarizacija na gejtju bila -45 V.

Uzorci su bili izloženi  $\gamma$ -zračenju korišćenjem izvora Co-60 sa brzinom doze od 0.5 Gy(SiO<sub>2</sub>)/min u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Instituta za nuklearne nauke "Vinča" u Srbiji. Obe grupe komponentata koje su najpre podvrgnute NTNNP (168 sati i 1 sat), kao i one koje nisu prethodno naprezane podeljene su u po dve podgrupe. Komponente prve podgrupe su ozračivane bez polarizacije, dok su komponente druge podgrupe ozračivane uz primenu pozitivne polarizacije gejtja od +10 V, pri čemu su sors i drejn svih komponentata bili uzemljeni. Svih šest podgrupa komponentata su ozračene do ukupne doze od 90 Gy.

Završna faza eksperimenta, termičko odžarivanje, izvedeno je na 175°C tokom 168 sati bez primenjene polarizacije. Pored toga, treba napomenuti da su se komponente spontano oporavljale između NTNNP i zračenja (tokom 670 sati) i između zračenja i odžarivanja (tokom 15 sati), u oba slučaja na sobnoj temperaturi bez polarizacije komponentata.

U cilju praćenja degradacije komponentata, NTNNP, ozračivanje i odžarivanje su prekidani nakon prethodno definisanog vremenskog perioda da bi se snimale prenosne karakteristike  $I_D$ - $V_G$ , na osnovu kojih je određen napon praga. Sva merenja su obavljana na sobnoj temperaturi. Na Sl. 1 su prikazani merna konfiguracija i uslovi merenja. Za električnu

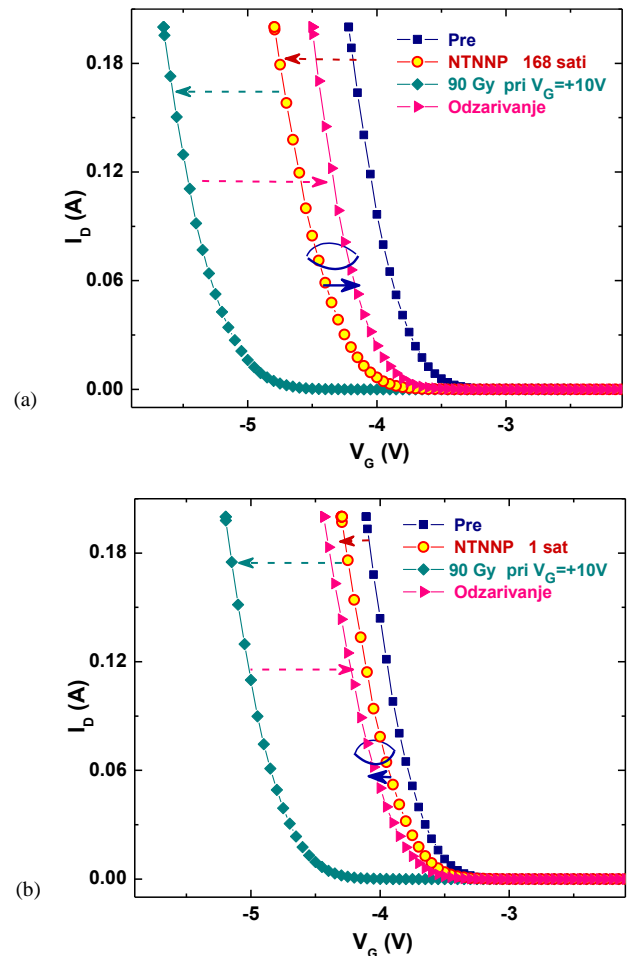


Sl. 1. Merenja istraživanih komponentata a) šema, i uslovi tokom napreznja b) pri NTNNP i c) pri ozračivanju.

karakterizaciju je korišćen visoko precizni Keysight Technologies B2901A (Source Measure Unit - SMU), koji je kontrolisan pomoću laptopa, preko GPIB-a.

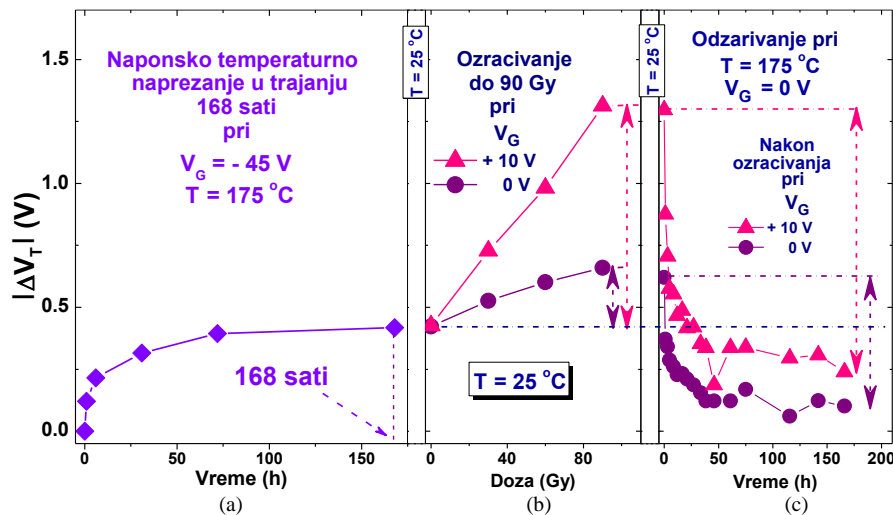
## III. REZULTATI I DISKUSIJA

Iako je u toku svakog procesa napreznja vršena karakterizacija, na Sl. 2 su prikazane samo prenosne strujno naponske karakteristike nakon NTNNP, ozračivanja do 90 Gy (pri  $V_G = +10$  V) i odžarivanja. Pri tome su na Sl. 2a i Sl. 2b predstavljene neke od prenosnih karakteristika p-kanalnih VDMOS tranzistora snage koji su podvrgnuti NTNNP tokom 168 sati i 1-og sata, respektivno.

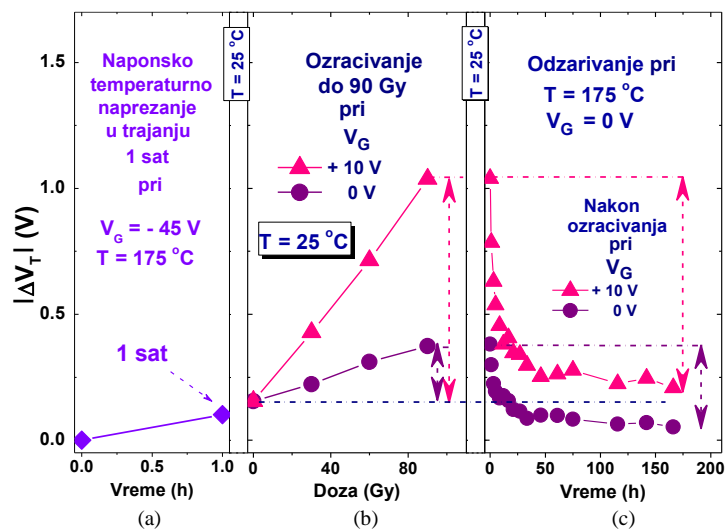


Sl. 2. Prenosne karakteristike p-kanalnog VDMOS tranzistora snage (IRF9520), nakon (a) 168 sati i (b) 1-og sata naponsko temperaturnog napreznja, ozračivanja pri  $V_G = +10$  V i odžarivanja.

Na osnovu Sl. 2 se jasno uočava da nakon primene NTNNP dolazi do pomeranja prenosnih karakteristika duž  $V_G$  ose ka negativnijim vrednostima, što ukazuje na porast napona praga ispitivanih tranzistora po apsolutnoj vrednosti, pri čemu su ove promene jasno izraženije kod uzoraka koji su duže naprezani, kao što se vidi na Sl. 3a i Sl. 4a. Ozračivanje do 90 Gy, koje je sledilo, je dovelo do značajnog daljeg pomeranja karakteristika duž  $V_G$  ose ka negativnijim vrednostima, kod obe grupe komponentata, odnosno do porasta  $V_T$  po apsolutnoj vrednosti (Sl. 3b i Sl. 4b), što je uočeno i kod komponentata koje prethodno nisu podvrgnute NTNNP, kao što se vidi na Sl. 5a.



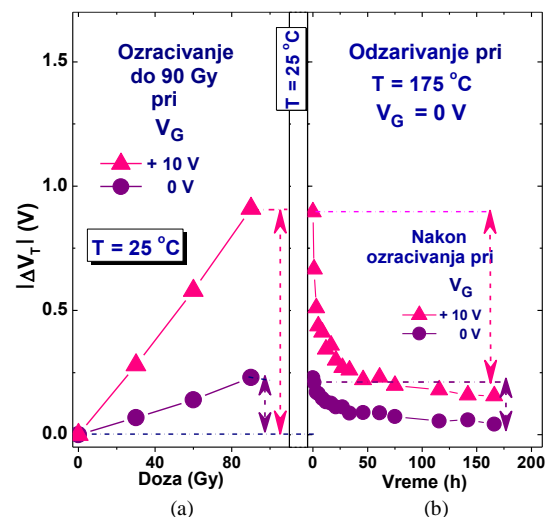
Sl. 3. Promene  $V_T$  p-kanalnih VDMOS tranzistora snage (IRF9520) tokom primene (a) NTNNP u trajanju od 168 sati, (b) ozračivanja i (c) odžarivanja.



Sl. 4. Promene  $V_T$  p-kanalnih VDMOS tranzistora snage (IRF9520) tokom primene (a) NTNNP u trajanju od 1-og sata, (b) ozračivanja i (c) odžarivanja.

Tokom ozračivanja komponenta kod kojih je primenjena polarizacija gejta došlo je do veće promene  $V_T$  usled formiranja znatno većeg broja defekata u oksidu gejta i zahvatanja nosilaca naelektrisanja na površinskim stanjima. Uopšte, dobro je poznato da su promene  $V_T$  prouzrokovane formiranjem naelektrisanja u oksidu gejta i površinskih stanja tokom određenog napreznja usled elektrohemijskih procesa koji uključuju defekte u oksidu, na međupovršini, šupljine i čestice vodonika.

Jonizujuće zračenje formira parove elektron-šupljina u strukturi gejta oksida i mada se neki parovi rekombinuju najveći broj elektrona napusti oksid [26]. Ukoliko je primenjena pozitivna polarizacija na gejtu elektroni napuštaju oksid upravo kroz gejtu, dok se najveći broj šupljina (koje imaju manju pokretljivost) zahvata na defektima, pri čemu dolazi do povećanja zahvaćenog pozitivnog naelektrisanja u oksidu [28]. U slučaju ozračivanja bez polarizacije gejta, u oksidu postoji malo pozitivno električno polje kao rezultat male kontaktne razlike potencijala između polisilicijumskog gejta i n-tipa balka kod p-kanalog MOSFET-a i može uticati



Sl. 5. Promene napona praga p-kanalnih VDMOS tranzistora snage (IRF9520) tokom (a) ozračivanja pri  $V_G = +10$  V i (b) odžarivanja.

na rezultate formiranja naelektrisanja u oksidu gejta pod dejstvom  $\gamma$  zračenja [34, 35].

Pored toga, konačni efekti ozračivanja zavise i od predistorije komponenata, tako da su konačne apsolutne vrednosti  $V_T$  najviše kod komponenata prethodno podvrgnutih NTNNP u toku 168 sati, dok su najmanje kod komponenata koje prethodno nisu podvrgnute NTNNP. Međutim, brzina promene  $V_T$  u toku procesa ozračivanja je nešto manje izražena kod komponenata podvrgnutih NTNNP, što može biti posledica manje brzine porasta i gustine naelektrisanja u oksidu gejta i površinskih stanja zbog smanjenog broja prekursora defekata nakon NTNNP. Pri tome su promene  $V_T$  tokom zračenja nešto izraženije kod komponenata prethodno podvrgnutih NTNNP tokom 168 sati nego tokom 1-og sata i ova razlika može biti posledica razlike u nastalim i započetim procesima u prvoj i drugoj fazi primenjenog NTNNP. Srednje vrednosti razlika u promenama napona praga nakon ozračivanja do 90 Gy ( $\Delta V_T(90 \text{ Gy})$ ) i nakon primene NTNNP ( $\Delta V_T(\text{NTNNP})$ ) su naznačene strelicama na desnoj strani Sl. 3b, Sl. 4b, a na Sl. 5a samo nakon ozračivanja i date su u Tab. 1.

Tabela 1. Srednje vrednosti promene  $\Delta V_T$  nakon ozračivanja u odnosu na vrednosti nakon primenjenog NTNNP.

	Vreme primenjenog NTNNP		
	168 sati	1 sat	0 (bez NTNNP)
$V_G$ tokom ozračivanja	$\Delta V_T(90 \text{ Gy}) - \Delta V_T(\text{NTNNP})$ (V)		$\Delta V_T(90 \text{ Gy})$
+ 10 V	0.897	0.882	0.912
0 V	0.220	0.218	0.232

Za komponente ozračene do 90 Gy, pri  $V_G=+10 \text{ V}$  razlika je 0.16 mV/Gy između komponenata na koje je primenjeno NTNNP 168 sati i 1 sat. Iako ove vrednosti nisu posebno velike mogu biti od interesa u slučaju ozračivanja do visokih doza, koje mogu biti primljene tokom rada uređaja u elektronskim sistema pri dugotrajnoj misiji u radijacionom okruženju.

Odžarivanje koje je primenjeno nakon ozračivanja i kratkotrajnog spontanog oporavka (Sl. 3c, Sl. 4c i Sl. 5b) dovodi do značajnog opadanja  $V_T$  po apsolutnim vrednostima. Pri tome je ovo opadanje najveće na samom početku, kod svih grupa komponenata i izraženije je ukoliko je pri ozračivanju primenjena polarizacija gejta. Vrednosti promena  $V_T$  u toku odžarivanja, kod komponenata na koje je primenjeno NTNNP (Sl. 3c i Sl. 4c), kao i na koje nije primenjeno NTNNP (Sl. 5b) date su u Tab. 2, a ove promene su naznačene i strelicama na desnoj strani ovih slika.

Treba napomenuti da konačne vrednosti  $\Delta V_T$  postignute nakon vremena odžarivanja od 168 sati na temperaturi od 175°C, u odnosu na vrednosti posle primene NTNNP, kvalitativno zavise od trajanja primenjenog NTNNP. Naime, kod svih komponenata na koje je primenjeno NTNNP u toku 168 sati, konačne (apsolutne) vrednosti  $\Delta V_T$  nakon odžarivanja su niže od onih neposredno nakon NTNNP. Međutim, kod komponenata na koje je primenjeno NTNNP u toku jednog sata vrednosti  $\Delta V_T$  nakon odžarivanja su niže od onih neposredno nakon NTNNP za komponente ozračene bez

polarizacije (pri  $V_G=0 \text{ V}$ ), dok su za komponente ozračene sa polarizacijom (pri  $V_G=+10 \text{ V}$ ) više. Ove razlike u vrednostima promena  $V_T$  mogu se videti sa Sl. 3c, i Sl. 4c, a mogu se jasno uočiti i na Sl. 2, gde je naznačen odnos karakteristika nakon NTNNP i nakon odžarivanja.

Tabela 2. Srednje vrednosti promene  $\Delta V_T$  u toku odžarivanja.

	Vreme primenjenog NTNNP		
	168 sati	1 sat	0 (bez NTNNP)
$V_G$ tokom ozračivanja	$\Delta V_T$ u toku odžarivanja (V)		
+ 10 V	1.0582	0.8306	0.7842
0 V	0.5194	0.3290	0.1980

Tokom odžarivanja ispitivane komponente nisu bile polarisane, pa su efekti koji se javljaju u komponentama termički aktivirani, tako da procesi koji se dešavaju i elektrohemijske reakcije mogu biti u vezi sa difuzijom nekih čestica vodonika. Tako čestice kao što su neutralni molekuli  $\text{H}_2$  i pozitivni joni  $\text{H}^+$  mogu da difunduju sa mesta gde je njihova koncentracija veća (oksid) ka mestima sa nižom koncentracijom (međupovršina), a može doći i do preraspodela zahvaćenog pozitivnog naelektrisanja u oksidu [36, 37]. Očigledno termički aktivirani procesi odžarivanja bez polarizacije (koji su u vezi sa difuzijom čestica vodonika) nisu dovoljni da smanje vrednosti promena napona praga na vrednost pre primene NTNNP kod komponenata na koje je primenjeno NTNNP u toku jednog sata i ozračenih do 90 Gy pod polarizacijom  $V_G=+10 \text{ V}$ .

#### IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazani eksperimentalni rezultati zračenja i odžarivanja p-kanalnih VDMOS tranzistora snage nakon primene naponsko temperaturnog naprežanja negativnom polarizacijom gejta tokom 168 sati i 1 sat. Svrha istraživanja je bila da se rasvetli trajanje NTNNP na efekte zračenja i odžarivanja, kako bi se ispitali efekti specifičnog uticaja zračenja na uređaje koji su prethodno bili izloženi naprežanju. Pokazano je da zračenje dovodi do daljeg porasta  $V_T$  kod svih komponenata koje su prethodno izložene NTNNP, pri čemu je ovaj porast malo izraženiji kod komponenata koje su prethodno bile izložene NTNNP tokom 168 sati, nego kod onih koje su bile izložene tokom jednog sata. To bi moglo biti od interesa u slučaju ozračivanja do visokih doza, koje mogu biti primljene tokom rada uređaja u elektronskim sistemima pri dugotrajnoj misiji u radijacionom okruženju. Takođe, primećeno je da kod uređaja izloženih NTNNP tokom jednog sata i ozračenih do 90 Gy pod polarizacijom, termički aktivirani procesi tokom odžarivanja (povezani sa difuzijom neutralnih čestica, kao što su molekuli vodonika) nisu dovoljni za smanjenje  $V_T$  na vrednost pre izlaganja NTNNP. To može biti od interesa kada se komponente ugrađuju u uređaje koji rade u pooštrenim uslovima, u okruženja gde su izloženi višestrukim naprežanjima.

Prikazani rezultati dobijeni su u okviru programa za finansiranje naučnoistraživačkog rada (pod brojem 451-03-9/2021-14/200102) koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i u okviru projekta “Osobine tankih i ultratankih oksidnih slojeva” (F-148), koji finansira Srpska akademija nauka i umetnosti-SANU. Rezultatima predstavljenim u ovom radu je u mnogome doprineo nedavno preminuli akademik Ninoslav Stojadinović i svojim naučnim i istraživačkim aktivnostima i značajnom saradnjom sa autorima.

## LITERATURA

- [1] B. Jayant Baliga, *Fundamentals of Semiconductor Power Devices*, Springer, New York, 2008.
- [2] T. P. Ma and P. V. Dressendorfer, *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits*, 1989, Wiley; New York.
- [3] S. Gamerith and M. Polzl, Negative bias temperature stress in low voltage p-channel DMOS transistors and role of nitrogen, *Microelectron. Reliab.* 42, 2002, 1439-1443.
- [4] N. Stojadinović et al., Effects of electrical stressing in power VDMOSFETs, *Microelectron. Reliab.* 45, 2005, 115-122.
- [5] G. S. Ristić, et al. Defect behaviors in n-channel power VDMOSFETs during HEFS and thermal post-HEFS annealing, *Appl. Surf. Sci.* 252 (8), 2006, 3023–3032.
- [6] X. R. Ye et al., VDMOSFET HEF degradation modelling considering turn-around phenomenon, *Microelectron. Reliab.* 50, 2018, 37-41.
- [7] N. Stojadinović et al., Analysis of gamma-irradiation induced degradation mechanisms in power VDMOSFETs, *Microelectron. Reliab.* 35, 1995, 587-602.
- [8] C. Pickard et al., Use of commercial VDMOSFETs in electronic systems subjected to radiation, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 47, 2000, 627-633.
- [9] M. S. Park, C. R. Wie, Study of radiation effects in  $\gamma$ -ray irradiated power VDMOSFET by DCIV technique, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 48, 2001, 2285-2293.
- [10] N. Tošić, et al., High-temperature-reverse-bias testing of power VDMOS transistors, *Microelec. Reliab.* 37, 1997, 1759-1762.
- [11] S. Djorić-Veljković et al. Effects of burn-in stressing on post-irradiation annealing response of power VDMOSFETs, *Microelectron. Reliab.* 43, 2003, 1455-1460.
- [12] P. Magnone et al., Investigation of degradation mechanisms in low-voltage p-channel power MOSFETs under High Temperature Gate Bias stress, *Microelectron. Reliab.* 88-90, 2018, 438-442.
- [13] N. Stojadinović et al., Negative bias temperature instability mechanisms in p-channel power VDMOSFETs, *Microelectron. Reliab.* 45, 2005, 1343-1348.
- [14] I. Manić et al., NBTI related degradation and lifetime estimation in p-channel power VDMOSFETs under the static and pulsed NBT stress conditions, *Microelectron. Reliab.* 51, 2011, 1540-1543.
- [15] A. N. Tallarico et al., Negative bias temperature stress reliability in trench-gated p-channel power MOSFETs, *IEEE Trans. Dev. Mater. Reliab.* 14, 2014, 657-663.
- [16] N. Stojadinović et al., Negative Bias Temperature Instability in Thick Gate Oxides for Power MOS Transistors, in *Bias Temperature Instability for Devices and Circuits*, edited by Tibor Grasser, 2014, Springer, New York, 533-559.
- [17] D. Danković et al., Negative bias temperature instability in p-channel power VDMOSFETs: recoverable versus permanent degradation, *Semicond. Sci. Technol.* 30, 2015, 105009.
- [18] H. Tahi et al., Experimental Investigation of NBTI Degradation in Power VDMOS Transistors Under Low Magnetic Field, *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 17 (1), 2017, 99-105.
- [19] A. Bhattacharjee, S.N. Pradhan, NBTI-Aware Power Gating Design with Dynamically Varying Stress Probability Control on Sleep Transistor, *J. Circuit Syst. Comp.* 2021, Art. no 2120004 2120004.
- [20] H. Tahi et al., Capacitance–Voltage Technique Based on Time Varying Magnetic Field for VDMOSFET-Part I: Concept and Implementation, *IEEE Trans. on Elec. Dev.* 68 (5), 2021, 2173-2180
- [21] N. Stojadinović et al., Effects of High Electric Field and Elevated-Temperature Bias Stressing on Radiation Response in Power VDMOSFETs, *Microelectron. Reliab.* 42, 2002, 669-677.
- [22] N. Stojadinović et al., Effects of Burn-in Stressing on Radiation Response of Power VDMOSFETs, *Microelectron. J.*, 33, 2002, 899-905.
- [23] D. K. Schröder, J. A. Babcock, Negative bias temperature instability: Road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing, *J. Appl. Phys.* 94, 2003, 1-18.
- [24] J. H. Stathis, S. Zafar, The negative bias temperature instability in MOS devices: A Review, *Microelectron. Reliab.* 46, 2006, 270-286.
- [25] T. Grasser et al., Recent advances in understanding the bias temperature instability, *IEEE Proc. IEDM*, 2010, 82-85.
- [26] V. Davidović et al., NBTI and irradiation effects in p-channel power VDMOS Transistors, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 63, 2016, 1268-1275.
- [27] V. Davidović et al., Effects of consecutive irradiation and bias temperature stress in p-channel power vertical double-diffused metal oxide semiconductor transistors, *Jap. J. App. Phys.* 57 (4), 2018, 044101-1-10.
- [28] V. Davidović et al., NBT Stress and Radiation Related Degradation and Underlying Mechanisms in P-Channel Power VDMOS Transistors, *Facta Universitatis: Electronics and Energetics*, 16 (4), 2018, 367-388.
- [29] D. Danković, et al., Radiation and Annealing Related Effects in NBT Stressed P-Channel Power VDMOSFETs, prihvaćeno za 32<sup>nd</sup> European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF 2021), Bordeaux (France) 8-8 October 2021
- [30] D. Danković et al., Implications of Negative Bias Temperature Instability in Power MOS Transistors, in *Micro Electronic and Mechanical Systems*, edited by Kenichi Takahata, 2009, IN-TECH Press, Boca Raton, 19.319-19.342
- [31] D. Danković et al., Negative Bias Temperature Instabilities in Sequentially Stressed and Annealed in p-Channel Power VDMOSFETs, *Microelectron. Reliab.* 47, 2007, 1400-1405.
- [32] I. Manić et al., Effects of Low Gate Bias Annealing in NBT Stressed p-Channel Power VDMOSFETs, *Microelectron. Reliab.* 49, 2009, 1003-1007
- [33] D.M. Fleetwood et al., An overview of radiation effects on electronics in the space telecommunication environment, *Microelectron. Reliab.* 40, 2000, 17-26.
- [34] T. R. Oldham and J. M. McGarrity, Comparison of <sup>60</sup>Co response and 10keV X-ray response in MOS capacitors, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 30, 1983, 4377-4381.
- [35] M.M. Pejovic, Application of p-channel power VDMOSFET as a high radiation doses sensor, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 62, 2015, 1905-1910.
- [36] D. M. Fleetwood, Effects of hydrogen transport and reactions on microelectronics radiation response and reliability, *Microelectron. Reliab.* 42, 2002, 523-541.
- [37] T. Grasser et al., The paradigm shift in understanding the bias temperature instability: from reaction-diffusion to switching oxide traps, *IEEE Trans. Electron. Dev.* 58, 2011, 3652-3666.

## ABSTRACT

The radiation and annealing effects in p-channel VDMOS power transistors which were formerly exposed to the negative bias temperature stress during different previously exactly determined time periods are presented in the paper. This experiment was conducted in order to explore the effects of particular radiation stress in components which were formerly exposed to other influences that may act as stress. It was noticed that radiation response of threshold voltage was slightly further changed for components which were previously NBT (negative bias temperature) stressed for one week, what may be of importance when high total doses were received. Besides, it was noticed that in components exposed to NBT stress for one hour before irradiation (up to 90 Gy) with positive gate voltage applied, thermally activated processes during subsequent annealing are not enough to reduce  $V_T$  to the magnitude before NBT stress, which might be of interest in the case when components work under harsh conditions.

### Effects of Radiation and Annealing in Bias Temperature Stressed p-channel power VDMOS transistors

Sandra Veljković, Nikola Mitrović, Snežana Đorić-Veljković, Vojkan Davidović, Snežana Golubović and Danijel Danković