

# Ispitivanje višeslojnih HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> struktura za memorijske komponente

Vojkan Davidović, *Member, IEEE*, Albena Paskaleva, *Member, IEEE*, Dencho Spassov, *Member, IEEE*, Elzbieta Guziewicz, Tomasz Krajewski, Snežana Golubović, *Member, IEEE*, Snežana Đorić-Veljković, *Member, IEEE*, Ivica Manić, *Member, IEEE*, Danijel Danković, *Member, IEEE* i Ninoslav Stojadinović, *Fellow, IEEE*

**Apstrakt**—U ovom radu ispitivane su karakteristike višeslojnih dielektričnih HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> struktura na silicijumu kao potencijalne komponente za primenu u fleš memorijama. Snimane su visokofrekventne C-V krive nakon primene serije pozitivnih ili negativnih napona kojima se simulira rad memorije, tj. zapis i brisanje informacije. Pokazano je postojanje memorijskih svojstava i značajan memorijski prozor, ali su neophodna dalja istraživanja u pogledu realizacije efikasnijih i pouzdanijih struktura.

**Ključne reči** — Dielektrik sa velikom vrednošću dielektrične konstante, višeslojne HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> strukture, C-V karakteristike, fleš memorije.

## I. UVOD

MINIJATURIZACIJA savremenih Si mikroelektronskih komponenata dovela je konvencionalne dielektrike zasnovane na SiO<sub>2</sub> do njihovih fizičkih ograničenja. Naime, kako su srazmernim smanjivanjem dimenzija komponenata i debljine oksida smanjivane na vrednosti do ispod nekoliko nm, došlo je do pojave neprihvatljivo visokih nivoa struja curenja kroz dielektrik usled velikih električnih polja. S druge strane, izraz (1) za struju zasićenja tranzistora ukazuje na njegove bolje performanse (izlazna struja, transkonduktansa) pri manjim d<sub>ox</sub>.

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

Albena Paskaleva – Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Tzarigradsko Chaussee 72, Sofia 1734, Bulgaria (e-mail: [paskaleva@issp.bas.bg](mailto:paskaleva@issp.bas.bg)).

Dencho Spassov – Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Tzarigradsko Chaussee 72, Sofia 1734, Bulgaria (e-mail: [d.spassov@issp.bas.bg](mailto:d.spassov@issp.bas.bg)).

Elzbieta Guziewicz – Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Al. Lotnikow 32/46, 02-668 Warsaw, Poland (e-mail: [guzel@ifpan.edu.pl](mailto:guzel@ifpan.edu.pl)).

Tomasz Krajewski – Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Al. Lotnikow 32/46, 02-668 Warsaw, Poland (e-mail: [krajew@ifpan.edu.pl](mailto:krajew@ifpan.edu.pl)).

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

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

Ivica Manić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: [ivica.manic@elfak.ni.ac.rs](mailto:ivica.manic@elfak.ni.ac.rs)).

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

Ninoslav Stojadinović – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija; Srpska akademija nauka i umetnosti (SANU) - ogranak u Nišu, Univerzitetski trg 2, 18000 Niš, Srbija (e-mail: [ninoslav.stojadinovic@elfak.ni.ac.rs](mailto:ninoslav.stojadinovic@elfak.ni.ac.rs)).

$$I_D = \frac{Z}{2L} \frac{\epsilon_0 \epsilon_{rox}}{d_{ox}} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (1)$$

U cilju prevazilaženja uočenih problema poslednjih godina se intenzivno ispituju mogućnosti zamene SiO<sub>2</sub> kao osnovnog dielektrika nekim materijalom sa velikom vrednošću dielektrične konstante ( $\epsilon_r$ , odnosno  $k$ ). Pri tome, razmatraju se brojni materijali sa visokom  $k$  [1-4], ali su najpogodniji Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, HfO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> čije su neke od karakteristika date u tabeli 1, uporedo sa karakteristikama SiO<sub>2</sub>.

TABELA I  
UPOREDNE KARAKTERISTIKE NEKIH OD KORIŠĆENIH OKSIDA

	$\epsilon_r$	$\Delta E_g$ (eV)	$\Delta E_C$ (eV)
SiO <sub>2</sub>	3.9	9	3.1
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	26	4.4	0.3
HfO <sub>2</sub>	25	6	1.5
ZrO <sub>2</sub>	25	5.8	1.4

Na osnovu dosadašnjih rezultata, pokazalo se da Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i HfO<sub>2</sub> zahvaljujući svojim karakteristikama mogu da budu pouzdana zamena za SiO<sub>2</sub> i SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> izolatore kao ključne komponente memorija. Zbog optimalne kombinacije vrednosti dielektrične konstante i struja curenja, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> je bio proglašen za vodeći dielektrik u izradi kondenzatora za dinamičke memorije. Međutim, za razliku od SiO<sub>2</sub> koji sa Si ostvaruje najkvalitetniju međupovršinu, pri kontaktiranju Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sa Si postoji mnogo veća verovatnoća za formiranje različitih defekata, kako u samom oksidu, tako i na međupovršini oksid-poluprovodnik [2]. Jasno je da ovi defekti, dovode do nestabilnosti električnih karakteristika komponente i ozbiljno ugrožavaju njenu pouzdanost. Zbog toga je detaljno ispitivan uticaj napreznja konstantnim naponom na pouzdanost MOS kondenzatora sa Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dielektrikom, kao i nivo degradacije Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> usled napreznja, i sve to u zavisnosti od vrste elektrode gejta (Al, W, Au) [5, 6]. Pokazano je da su ključni parametri u proceni nivoa degradacije usled napreznja konstantnim naponom prekursori centara zahvata.

Da bi se ustanovili mehanizmi provodljivosti i centri zahvata naelektrisanja odgovornih za njih, vršeno je dopiranje Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> hafnijumom i ispitivana je struja curenja kao posledica napreznja konstantnim naponima ultratankih oksidnih slojeva (7; 10 nm) Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [7]. Količina hafnijuma je određena tako da utiče na mehanizme provođenja, na temperaturnu zavisnost struje curenja, kao i na odziv struje na stres.

Rezultati su pokazali da naprezanje konstantnim naponima utiče na već postojeće centre zahvata u oksidnim slojevima Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dopiranim hafnijumom, menjajući njihove parametre, ali nisu potvrdili da je priroda centara zahvata, formiranih pod dejstvom naprezanja, različita od prirode defekata povezanih sa vakancijama kiseonika.

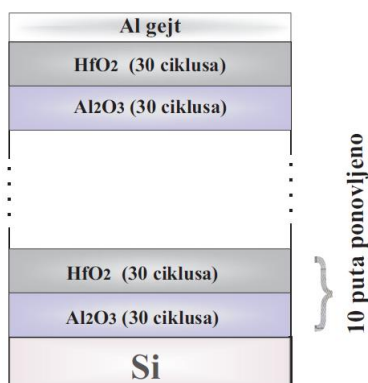
Takođe, istraživana je i fizika procesa degradacije dopiranog Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> usled stresa konstantnom strujom i dinamike proboja dopiranih tankih slojeva dielektrika. Pažnja je bila usmerena na uticaj stresa na centre zahvata koji kontrolišu struje curenja, i na njihovu vezu sa već postojećim centrima zahvata, kao i na ulogu dopanata (Al, Ti, Hf) u njihovom formiranju [7 - 10].

Pored toga, poslednjih desetak godina, kao pogodna zamena za konvencionalne dielektrike u izradi memorija sve češće se ističu dielektrici na bazi Hf i Zr [3, 4, 11, 12]. U vezi sa tim, treba istaći da su noviji rezultati ispitivanja HfO<sub>2</sub> i ZrO<sub>2</sub> kao filmova za fleš memorije, u kojima se mogu zahvatati naelektrisanja, veoma obećavajući [13 - 18]. Uz to, sugerisano je da bi formiranje HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sendvič struktura bitno pojačalo njihov efekat zahvatanja naelektrisanja, što bi se moglo iskoristiti u izradi fleš memorija [13, 15, 19, 20]. U tu svrhu ispitivani su uzorci HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sendvič struktura sa različitim debljinama Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sloja [21]. Međutim, kako su mnogobrojna dosadašnja istraživanja potvrdila da su svojstva HfO<sub>2</sub> i ZrO<sub>2</sub>, kao high-*k* materijala, ekstremno osetljiva na metode i uslove izrade struktura, neophodna su dalja detaljna istraživanja prevashodno u cilju optimizacije metoda njihovog formiranja kako bi se dobile adekvatne karakteristike.

U ovom radu su predstavljeni dodatni rezultati eksperimentalnog ispitivanja višeslojnih HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sendvič struktura koje bi mogle biti korišćene za izradu memorijskih komponenta (fleš memorija).

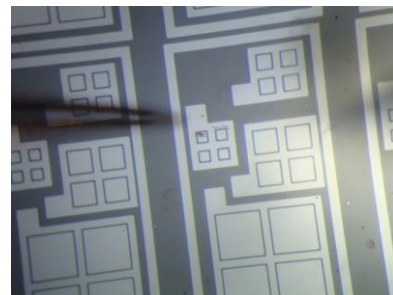
## II. EKSPERIMENT

Kao eksperimentalni uzorci za ova istraživanja korišćeni su MOS kondenzatori sa Al gejtom i posebno dizajniranim dielektrikom u obliku višeslojne HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sendvič strukture (Sl. 1). Veoma tanki slojevi materijala formirani su metodom depozicije atomskih slojeva (*atomic layer deposition*), tako da struktura između gejta i poluprovodnika ima veći broj međupovršina na kojima se može zahvatati naelektrisanje.



Sl. 1. Šematski prikaz ispitivanih MOS kondenzatorskih struktura sa višeslojnim HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dielektrikom.

Filmovi HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> su nanošeni na silicijumsku pločicu p-tipa (100) otpornosti 6-8 Ωcm, pri temperaturi ambijenta 135°C. Najpre, na Si pločicu je nanošen sloj Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> formiran kroz 30 ciklusa depozicije atomskih slojeva, a preko njega sloj HfO<sub>2</sub>, takođe formiran kroz 30 ciklusa depozicije. Sekvenca depozicije Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - HfO<sub>2</sub> bila je ponavljana 10 puta, tako da je kao rezultat ovog procesa nastala višeslojna sendvič struktura. Konačna izmerena debljina strukture iznosi 65 nm. Električna karakterizacija ovih kondenzatorskih struktura obavljena je merenjem visokofrekventnih (1 MHz) kapacitivno-naponskih (C-V) karakteristika korišćenjem C-V merača tipa Agilent 4980A LCR. Merenim kondenzatorima pristupano je uz pomoć probera sa obezbeđenom elektrostatičkom zaštitom, a merenja su vršena u mraku (Sl. 2).



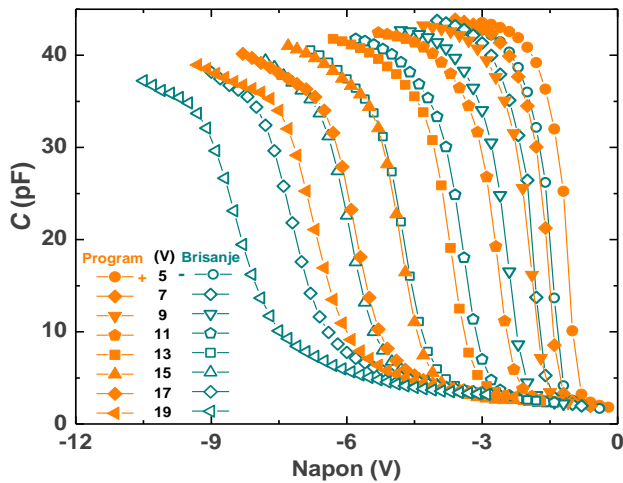
Sl. 2. Snimak testnih uzoraka ispitivanih HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> struktura.

U jednom delu eksperimenta uzorci su bili naizmenično naprezani pozitivnim i negativnim naponima primenom konstantnih napona u opsegu od 5 V do 20 V sa progresivnim uvećanjem za po 1V u trajanju od po 1 s. Pozitivnim naponima trebalo je simulirati proces zapisa informacije, a negativnim proces brisanja sadržaja. Veličina napona usaglašena je sa debljinom strukture, a vreme od 1 s je znatno veće od vremena zapisa kod fleš memorije. Posle svakog akta naprezanja snimane su C-V karakteristike. U drugom delu eksperimenta, nakon serije identičnih naprezanja do 20 V, naprezanje je nastavljeno višestrukum naizmeničnom primenom napona od +20 V i -20 V, takođe u trajanju od 1 s.

## III. REZULTATI I DISKUSIJA

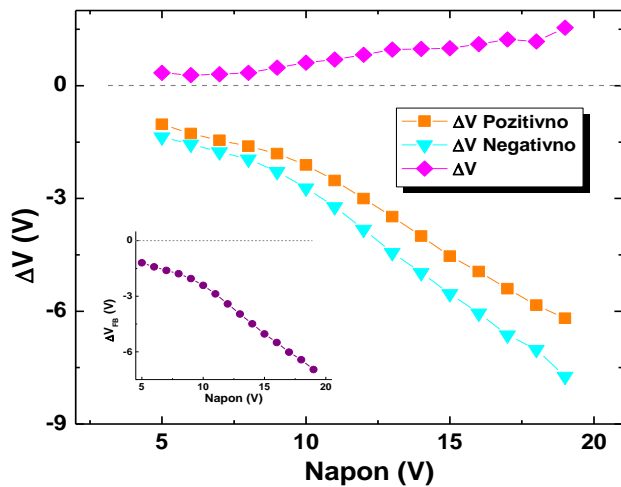
Na Sl. 3 su prikazane tipične visokofrekventne C-V karakteristike kondenzatorskih struktura sa višeslojnim HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dielektrikom. Treba napomenuti da su, zbog preglednosti, na ovoj slici prikazane samo C-V karakteristike snimane nakon naprezanja određenim vrednostima napona.

Sa Sl. 3 se jasno vidi da naizmenično naprezanje ovih struktura pozitivnim i negativnim naponima dovodi do pomeranja C-V karakteristika duž naponske ose u smeru ka negativnijim vrednostima napona. Pri tome, zapaža se da se sa povećanjem vrednosti napona naprezanja povećavaju i pomeraji C-V karakteristika, što je prikazano na Sl. 4. Na ubačenoj slici je prikazana promena širine tzv. memorijskog prozora (koji je određen razlikom napona ravnih zona nakon naprezanja pozitivnim i negativnim naponom). Osim naponskog pomeranja C-V karakteristika primećuje se i postepena promena njihovog nagiba, pri čemu je ona najizraženija za najveće vrednosti primenjenog napona.



Sl. 3. Tipične C-V karakteristike kondenzatorskih struktura sa višeslojnim  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  dielektrikom nakon naizmeničnog napreznja pozitivnim i negativnim naponima.

Ovde treba napomenuti i da su i pomeraji i promene nagiba C-V karakteristika izraženiji pri negativnim vrednostima primenjenog napona. U osnovi ovakvog ponašanja C-V karakteristika moraju biti mehanizmi promene gustina naelektrisanja u dielektriku i na međupovršinama. I dok je kod obične MOS strukture ovakav efekat lako objasniti, ovde se radi o složenoj strukturi sa dva dielektrika (svaki sa po 10 slojeva) i sa ukupno 19 međupovršina između  $\text{HfO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i jednom međupovršinom sa poluprovodnikom i jednom sa Al (Sl. 1). Tome u prilog ide i činjenica da ponašanje strukture zavisi i od njene prethodne istorije – broja ciklusa i napona napreznja.

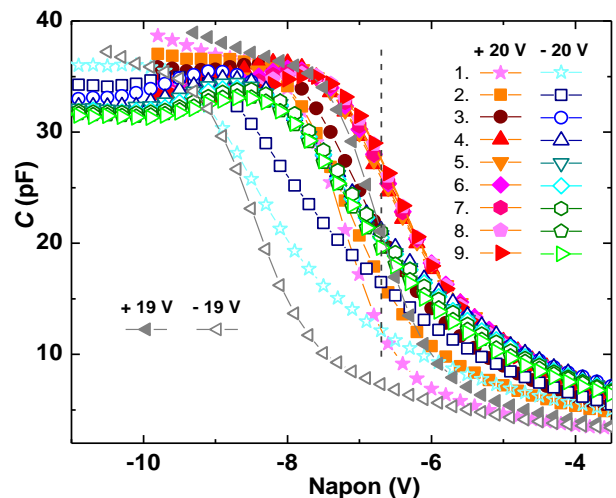


Sl. 4. Zavisnost napona ravnih zona tokom napreznja pozitivnim i negativnim naponima višeslojne  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  strukture. Ubačena slika: veličina memorijskog prozora kao funkcija napona

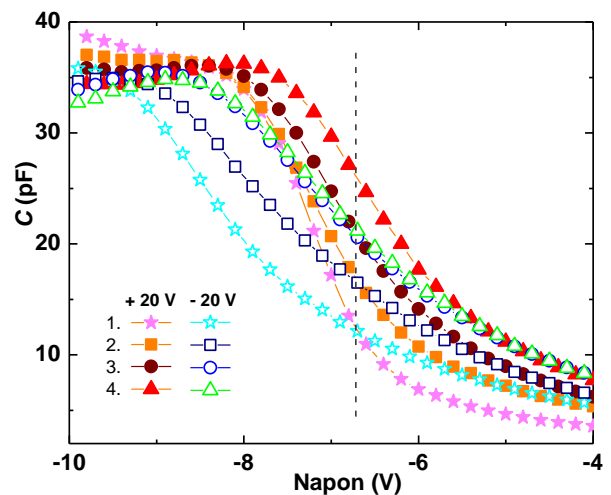
Treba istaći da se ponašanje ovih uzoraka razlikuje od ponašanja uzoraka čiji dielektrik predstavlja višeslojnu strukturu  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , ali sa nešto tanjim slojevima  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10 ciklusa depozicije atomskih slojeva umesto 30) [21]. Naime, kod uzoraka sa tanjim dielektrikom impulsno napreznje pozitivnim naponima dovodi do pomeranja C-V karakteristika u pozitivnom smeru duž naponske ose. S druge strane, impulsno napreznje negativnim naponima vraća C-V

karakteristike pomerajući ih u negativnom smeru duž naponske ose. S obzirom na to da je svaki pomeraj karakteristika ka negativnim naponima posledica postojanja nekog pozitivnog naelektrisanja, može se zaključiti da je u poslednjem slučaju manje pozitivnog naelektrisanja generisanog u tanjem sloju  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oksida, ukazujući da se u  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sloju formiraju defekti i naelektrisanja odgovorni za rad i pouzdanost komponente.

Posle napreznja naponima od 5 do 20 V nastavljen je eksperiment u vidu uzastopnog višestrukog napreznja naponima +20 V i -20 V, kao što je prikazano na Sl. 5. Primetan je trend da se već nakon 5 ciklusa karakteristike stabilizuju, odnosno gomilaju oko iste krive. Posmatrajući karakteristike tokom prvih četiri ciklusa (Sl. 6) primetni su i pomeraji karakteristika po naponskoj osi i promena njihovog nagiba.



Sl. 5. Evolucija C-V karakteristika tokom višestrukog (9 ciklusa) naizmeničnog napreznja naponima +20 V i -20 V u trajanju od 1s. Referentne karakteristike iz prethodne etape (+19 V i -19 V) na koje se nadovezuje ova sekvencija su takođe prikazane.



Sl. 6. Evolucija C-V karakteristika tokom prvih četiri ciklusa naizmeničnog napreznja naponima +20 V i -20 V u trajanju od 1s.

Naime, nakon prve primene +20V u strukturu dielektrika zahvataju se negativna naelektrisanja (elektroni iz inverznog sloja) i karakteristika ima strm nagib. Međutim, u sledećem

ciklusu napon -20 V ne dovodi samo do pomeraja po naponskoj osi ulevo, već se nagib karakteristike znatno menja, što ukazuje na uticaj površinskih stanja na oblik merene krive. Ovde je bitno istaći da je teško reći koji deo komponente doprinosi ovakvom ponašanju. Naime, osim međupovršine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Si izvesno je da i neke druge međupovršine daju svoj doprinos, ali složenost testirane strukture zahteva dodatnu karakterizaciju.

#### IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivane su mogućnosti MOS kondenzatora realizovanih sa višeslojnim high- $k$  dielektrikom  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  za primene u fleš memorijama. Pokazano je da višeslojna struktura sa 20 slojeva pokazuje memorijske karakteristike, ali su potrebna dodatna istraživanja da bi se realizovala efikasna i pouzdana komponenta. Veruje se da će metoda depozicije tankih jednoatomskih slojeva kao i veliki izbor elemenata koji se mogu deponovati u skorijoj budućnosti dati mogućnost da se zahtevana struktura realizuje.

#### ZAHVALNICA

Prikazani rezultati dobijeni su u okviru istraživanja na projektu "Osobine tankih i ultratankih oksidnih slojeva" (F-148), koji finansira Srpska akademija nauka i umetnosti (SANU) i na projektu "Dynamic aspects of electrical breakdown of memory capacitors based on high- $k$  Hf- and Al-doped  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ " koji finansiraju Srpska akademija nauka i umetnosti (SANU) i Bugarska akademija nauka (BAN).

#### LITERATURA

- [1] J.A. Kittl, K. Opsomer, M. Popovici, N. Menou, B. Kaczer, X.P. Wang, C. Adelman, M.A. Pawlak, K. Tomida, A. Rothschild, B. Govoreanu, R. Degraeve, M. Schaekers, M. Zahid, A. Delabie, J. Meersschaut, W. Polspoel, S. Clima, G. Pourtois, W. Knaepen, C. Detavernier, V.V. Afanas'ev, T. Blomberg, D. Pierreux, J. Swerts, P. Fischer, J.W. Maes, D. Manger, W. Vandervorst, T. Conard, A. Franquet, P. Favia, H. Bender, B. Brijs, S. Van Elshocht, M. Jurczak, J. Van Houdt, D.J. Wouters, "High- $k$  dielectrics for future generation memory devices", *Microelectron. Eng.*, vol. 7-9, pp. 1789-1795, Sep., 2009.
- [2] E. Atanassova and A. Paskaleva, "Challenges of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  as high- $k$  dielectric for nanoscale DRAMs", *Microelectron. Reliab.*, vol. 47, no. 6, pp. 913-923, Jun, 2007.
- [3] E.P. Gusev, C. Cabral Jr., M. Copel, C. D'Emic, M. Gribelyuk, "Ultrathin  $\text{HfO}_2$  films grown on silicon by atomic layer deposition for advanced gate dielectrics applications", *Microelectron. Eng.*, vol. 69, no. 2-4, pp. 145-151, 2003.
- [4] D.C. Hsu, M.T. Wang, J.Y. Lee, P.C. Juan, "Electrical characteristics and reliability properties of metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with  $\text{ZrO}_2$  gate dielectric", *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 9, pp. 094105-1-094105-4, 2007.
- [5] E. Atanassova, N. Stojadinovic, A. Paskaleva, "Degradation behavior of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  stacks and its dependence on the gate electrode", *Microelectron. Reliab.*, vol. 48, pp.1193-1197, 2008.
- [6] E. Atanassova, A. Paskaleva, N. Novkovski, "Effects of the metal gate on the stress-induced traps in  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  stacks", *Microelectron. Reliab.*, vol. 48, no. 4, pp. 514-525, April, 2008.
- [7] I. Manić, E. Atanassova, N. Stojadinović, D. Spasov, A. Paskaleva, "Hf-doped  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  Stacks Under Constant Voltage Stress", *Microelectron. Eng.*, vol. 88, no. 3, pp. 305 - 313, 2011.
- [8] A. Paskaleva, M. Tapajna, E. Atanassova, K. Frohlich, A. Vincze, E. Dobročka, "Effect of Ti doping on  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  stacks with Ru and Al gates", *Appl. Surface Sci.*, vol. 254, no. 18, pp. 5879-5885, Jul 15, 2008.
- [9] E. Atanassova, P. Lytvyn, R.V. Konakova, V.F. Mitin, D. Spassov, "Conducting and topographic AFM analysis of Hf-doped and Al-doped  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  films", *Thin Solid Films*, vol. 519, no. 22, pp. 8182-8190, Sep., 2011.

- [10] E. Atanassova, N. Stojadinović, D. Spassov, I. Manić, A. Paskaleva, "Time-Dependent Dielectric Breakdown in Pure and Lightly Al-Doped  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  Stacks", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 28, no. 5, Article Number 055006, 2013.
- [11] W. Andreoni, A.C. Callegari, E.A. Cartier, A. Curioni, C.P. D'Emic, E. Gousev, M.A. Gribelyuk, P.C. Jamison, R. Jammy, D.L. Lacey, F.R. McFeely, V. Narayanan, C.A. Pignedoli, J.F. Shepard Jr., S. Zafar, "Method of forming metal/high- $\kappa$  gate stacks with high mobility", patent US8153514 B2, 2012.
- [12] C.K. Chiang, J.C. Chang, W.H. Liu, C.C. Liu, J.F. Lin, C.L. Yang, J.Y. Wu, C.K. Chiang, S.J. Wang, "A comparative study of gate stack material properties and reliability characterization in MOS transistors with optimal ALD Zirconia addition for hafnia gate dielectric", *Proc. of IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Anaheim, California, USA, pp. GD.3.1-GD.3.4, 15-19 April 2012.
- [13] C. Zhao, C.Z. Zhao, S. Taylor, P.R. Chalker, "Review on non-volatile memory with high- $k$  dielectrics: flash for generation beyond 32 nm", *Materials*, vol. 7, pp. 5117-5145, 2014.
- [14] H.W. You, W.J. Choa, "Charge trapping properties of the  $\text{HfO}_2$  layer with various thicknesses for charge trap flash memory applications", *Appl. Phys. Lett.* vol. 96, pp. 093506-1-093506-3, 2010.
- [15] Y. Zhang, Y.Y. Shao, X.B. Lu, M. Zeng, Z. Zhang, X.S. Gao, X.J. Zhang, J.M. Liu, J.Y. Dai, "Defect states and charge trapping characteristics of  $\text{HfO}_2$  films for high performance nonvolatile memory applications", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, pp. 172902-1-172902-3, 2014.
- [16] J. Liu, Q. Wang, S. Long, M. Zhang, M. Liu, "A metal/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$  (MAZOS) structure for high-performance non-volatile memory application", *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 25, pp. 055013-1-055013-4, April, 2010.
- [17] J.X. Chen, J.P. Xu, L. Liu, P.T. Lai, "Performance improvements of metal-oxide-nitride-oxide-silicon nonvolatile memory with  $\text{ZrO}_2$  charge-trapping layer by using nitrogen incorporation", *Appl. Phys. Express*, vol. 6, no. 8, pp. 084202-1-084202-4, 2013.
- [18] D. Spassov, A. Skeparovski, A. Paskaleva, N. Novkovski, "A comparative study of charge trapping in  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  based multilayered metal/high- $k$ /oxide/Si structures", *Thin Solid Films*, vol. 614, pp. 7-15, 2016.
- [19] C. Zhu, Z. Huo, Z. Xu, M. Zhang, Q. Wang, J. Liu, S. Long, M. Liu, "Performance enhancement of multilevel cell nonvolatile memory by using a bandgap engineered high- $k$  trapping layer", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, pp. 253503-1-253503-3, 2010.
- [20] X. Lan, X. Ou, Y. Cao, S. Tang, C. Gong, B. Xu, Y. Xia, J. Yin, A. Li, F. Yan, Z. Liu, "The effect of thermal treatment induced inter-diffusion at the interfaces on the charge trapping performance of  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  nanolaminate-based memory devices", *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 4, pp. 044104-1-044104-7, 2013.
- [21] D. Spassov, A. Paskaleva, E. Guziejewicz, G. Luka, T. A. Krajewski, K. Kopalko, A. Wierzbicka and B. Blagoev, "Electrical characteristics of multilayered  $\text{HfO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  charge trapping stacks deposited by ALD", *Journal of Physics: Conference series*, vol. 764, article no. 012016, 2016.

#### ABSTRACT

**In this paper the characteristics of multilayer  $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  dielectric-on-silicon structures as a potential device for flash memory applications were investigated. The high frequency C-V plots were measured after application of series of positive or negative voltages which should simulate the memory operation, i.e. writing or erasing data. It was shown the existence of memory properties and significant memory window, but further research for realization of more efficient and reliable structures is necessary.**

#### Investigation of multilayer $\text{HfO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ structures for memory devices

Vojkan Davidović, Albena Paskaleva, Dencho Spassov, Elzbieta Guziejewicz, Tomasz Krajewski, Snežana Golubović, Snežana Đorić-Veljković, Ivica Manić, Danijel Danković and Ninoslav Stojadinović