

Materijali sa širokim energijskim procepom primenjeni u elektronici snage

Jelena Milojković, Vančo Litovski

Apstrakt—Materijali sa širokim energijskim procepom kao što su GaN i SiC nalaze sve veću primenu u modernim elektronskim komponentama, a posebno u komponentama za prekidačke namene u energijskim sistemima. Analiza osobina materijala i odgovarajućih komponenta u modernoj elektronici velikih snaga je od ključnog interesa za ekonomično projektovanje modernih energijskih sistema zasnovanih na klasičnim i obnovljivim izvorima energije. Ovde će biti data poređenja svojstava materijala i komponentata kao i osnovne informacije o ponašanju komponentata u slučaju prekidanja velikih snaga. Biće obuhvaćene klasične silicijumske komponente (MOS i IGBT) kao i komponente zasnovane na GaN (HEMT) i SiC (MOS).

Ključne reči—Energijski procep, SiC, Silicijum, GaN, MOS, HEMT, prekidači, elektronika snage.

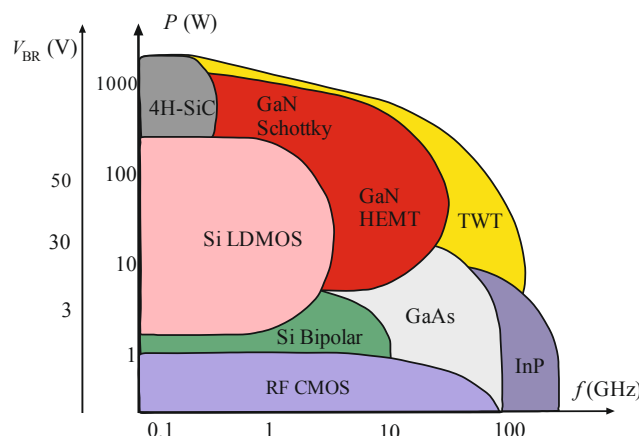
I. UVOD

Od pojave prvog tranzistora do danas upotreba poluprovodničkih materijala raste i po količini i po raznovrsnosti. Germanijum se smatra poluprovodničkim materijalom prve generacije, a silicijum je kasnije preuzeo glavnu ulogu. Mada silicijum i danas predstavlja materijal koji se neuporedivo najviše koristi za gradnju elektronskih komponentata, zbog specifičnih primena, pojavili su se i odgovarajući materijali. To se najpre odnosilo na razvoj optoelektronskih komponentata tako da su se pojavila tzv. III-V jedinjenja kao što su GaP, InSb, GaAs, InP i sl., tzv. II-VI jedinjenja kao što su ZnS, CdS ili CdTe kao i neka još složenija. Naravno, ovi materijali našli su primenu i u visokofrekvencijskim telekomunikacionim sistemima što se lako vidi sa Sl. 1 gde su prikazana ograničenja vezana za napone proboja i maksimalnih snaga komponentata napravljenih od različitih materijala u funkciji od frekvencije primene [1].

U novije vreme u upotrebi su GaN kao III-V jedinjenje i 4H-SiC (varijanta SiC koja je najpogodnija za primenu u elektronici snage) kao IV-IV kristal. U oba slučaja pokazuju se svojstva koja su pogodna za primenu u tranzistorima snage. Imajući u vidu savremeni razvoj proizvodnje električne energije pri čemu se u velikoj meri koriste alternativni izvori energije i time nastaje potreba za inverzijom jednosmernih u naizmernične napone kao i konverzijom vrednosti napona, ove komponente su postale odlučujuće za ekonomičnu primenu novih izvora energije. Naravno, njihova primena nije ograničena samo na energijske sisteme. Najnovije primene u industriji električnih automobila su dale veliki podstrek razvoju ovih komponentata.

Jelena Milojković, ICNT, Bulevar Nikole Tesle 61, lokal 5, Niš, Srbija (e-mail: Jelena.milojkovic@icnt.rs).

Vančo Litovski, Penzioner, V. Mišića 60-18, Niš, Srbija, (e-mail: vanco@elfak.ni.ac.rs).



Sl. 1. Napon proboja i maksimalna snaga upotrebe u funkciji od frekvencije modernih komponentata (TWT=cevi sa progresivnim talasima)

Kao što se vidi sa Sl. 1 moderna elektronika koristi širok skup materijala. Zavisno od frekvencije, maksimalna snaga koja se razvija na komponenti i maksimalni probojni napon određuju tip materijala koji će biti upotrebljen. Tako, za niskofrekvencijske primene (kao što je frekvencija električne mreže), a pri vrlo velikim snagama, danas se preporučuje 4H-SiC. Ako se, međutim, razmatraju prekidačke primene komponente, za konačni izbor moraju da se uzmu u obzir i drugi parametri kao što je minimalni napon na komponenti odnosno otpornost komponente kada je u provodnom stanju (R_{on}), kapacitivnosti komponente kao i osetljivost na parazitne efekte usled montaže.

Cilj ovog rada jeste sagledavanje svojstava poluprovodničkih komponentata sa stanovišta primene u prekidačima velike snage. Biće razmotrene četiri komponente koje se danas najčešće koriste. To su

- Si MOS tranzistor
- SiC MOS tranzistor
- Si IGBT i
- GaN HEMT.

Biće ustanovljene njihove prekidačke osobine sa posebnim osvrtom na potrošnju u stabilnim stanjima, na vremena uspostavljanja ivica i na uticaj parazitnih efekata veza na ponašanje prekidača.

Rad je podeljen tako da se najpre opisuju osobine materijala, a zatim se daje konstrukcija pomenutih tranzistora. Radi ustanovljavanja prekidačkih osobina uvodi se elektronsko kolo prekidača, a njegove osobine dobijaju se simulacijom čiji će rezultati biti dati u grafičkom obliku. Sledi kratko poređenje i zaključak.

II. UPOREDNE OSOBINE MATERIJALA SA ŠIROKIM ENERGIJSKIM PROCEPOM

Tabela I, [2],[3] daje pregled najvažnijih svojstava modernih materijala koji se koriste za gradnju tranzistora velikih snaga. Značenje veličina je sledeće: E_g - energijski procep; n_i sopstvena koncentracija; K_s - kritično polje zasićenja

brzine nosilaca; T_{\max} - maksimalna temperatura upotrebe materijala; Θ - termička provodnost materijala; μ_n - pokretljivost elektrona; v_{sat} - najveća brzina kretanja nosilaca; K_c - kritično polje proboja.

TABELA I
OSNOVNE OSOBINE IZABRANIH POLUPROVODNIČKIH MATERIJALA

Materijal	E_g ($\Gamma=300\text{K}$) (eV)	n_i ($\Gamma=300\text{K}$) ($10^{10}\cdot\text{cm}^{-3}$)	K_c ($\frac{\text{MV}}{\text{m}}$)	T_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)
Si	1.12	1,45	300	200
4H-SiC	3.26	10^{-4}	3500	600
GaN	3.5	10^{-10}	3300	400-900
Materijal	Θ ($\frac{\text{W}}{\text{cm}\cdot\text{K}}$)	μ_n ($\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$)	v_{sat} (m/s)	K_s ($\frac{\text{MV}}{\text{m}}$)
Si	1,5	1450	$1\cdot 10^7$	6
4H-SiC	4,9	900	$2\cdot 10^7$	10
GaN	1,3	2000	$2,5\cdot 10^7$	20

Analizom Tabele I može se uočiti da 4H-SiC i GaN imaju približno tri puta veći energijski procep nego silicijum i zato se nazivaju materijalima sa širokim energijskim procepom (ŠEP). Direktna posledica veličine energijskog procepa jeste veoma mala koncentracija sopstvenih nosilaca (n_i) na sobnoj temperaturi što znači da imaju veoma malu specifičnu provodnost kada su u čistom stanju. Dalja posledica toga je visoka radna temperatura ovih materijala koja je za nekoliko stotina stepeni viša od maksimalne radne temperature silicijuma što omogućava primenu u komponentama velike snage i smanjuje cenu podsistema za hlađenje.

Posebna odlika 4H-SiC jeste visoka termička provodnost što mu daje prednost u snažnim primenama (o čemu će biti posebno reči kasnije) dok se GaN odlikuje visokom brzinom zasićenja što ga čini poželjnijim za visokofrekvencijske primene.

III. MODERNE ELEKTRONSKE KOMPONENTE SNAGE I NJIHOVA PRIMENA

Kada se govori o tranzistorima snage mogu da se prepoznaju tri karakteristične situacije koje odgovaraju trima specifičnim položajima mirne radne tačke. U opštem slučaju očekuje se da su i napon i struja na izlaznim priključcima tranzistora veliki. Snaga je velika, međutim, i kada je struja relativno mala, a napon ekstremno veliki i obrnuto. U prvom slučaju imamo stanje koje je blisko otvorenom, a u drugom zatvorenom prekidaču. Da bi jedna komponenta mogla da iznese visoke napone, struje i snage mora da ima specijalne osobine kako sa stanovišta materijala tako i sa stanovišta konstrukcije.

Disipirana snaga mora se prvo odvesti iz područja koje ostvaruje osnovnu funkciju komponente, zatim sa čipa i najzad sa kućišta. Za prvu od ovih funkcija nadležne su toplotne osobine materijala, a za ostale dve tehnološki postupci (koje ovde nećemo razmatrati). Kao što se vidi iz Tabele I. 4H-SiC ima tri puta veći koeficijent toplotne provodnosti Θ što ga čini veoma pogodnim za primene u tranzistorima snage. Tome treba dodati činjenicu da je temperaturna zavisnost energijskog procepa GaN i 4H-SiC skoro identična što potvrđuje prednost 4H-SiC.

Za dati napon koji bi bio priključen na poluprovodničku pločicu, struja se može uvećati povećanjem koncentracije glavnih nosilaca. Ovaj zahvat, međutim, može da ima neželjene posledice. Naime, posle nekog nivoa dopiranja, usled velike koncentracije primesa, počinje da opada energijski procep poluprovodnika. Kao posledica toga povećava se n_i , a pošto je $p_n = n_i^2 / N_D$, povećava se

koncentracija sporednih nosilaca (p_n). Ovim se delimično neutralizuje efekat dodavanja primesa. Sa ovog stanovišta, poželjniji su materijali koji imaju manje n_i . Iz Tabele I. zaključujemo da je GaN najbolji kandidat sa ovog stanovišta, i da su 4H-SiC i GaN u prednosti u odnosu na Si.

Da bi se odredila vrednost struje drifta poluprovodnika koristi se koncept pokretljivosti. Struja je veća ako je pokretljivost veća. Imajući u vidu Tabelu I. lako zaključujemo da je GaN najpoželjniji sa ove tačke gledišta. Glavni problem koji je vezan za pokretljivost u komponentama snage jeste činjenica da pokretljivost opada sa porastom koncentracije glavnih nosilaca. To znači da povećanje N_D , pri velikim koncentracijama, za datu vrednost priključnog polja, neće dovesti do proporcionalnog povećanja struje. To znači da je veoma teško napraviti sloj poluprovodnika koji će imati ekstremno malu otpornost što je poželjno u komponentama snage. Tome treba dodati činjenicu da pokretljivost opada sa porastom temperature što povećava otpornost i čini komponente snage da imaju negativni temperaturni koeficijent struje drejna.

Pošto je p-n spoj osnovni podsistem svake poluprovodničke komponente (pa čak i Šotkijeve diode), njegov napon proboja je od suštinskog značaja za određivanje najvećeg dozvoljenog napona svake komponente. Na žalost, napon proboja, za data svojstva poluprovodnika sa obe strane spoja, praktično je određen svojstvima površine komponente na mestu spoja.

Postoji više tehnika za povećanje napona proboja poluprovodnika koji pokušavaju da, svaki na svoj način, neutrališu pojedine uzroke smanjenja napona proboja. Među tim metodama je najčešća primena zaštitnih prstenova oko komponente što povećava poluprečnik krivine (ka površini komponente) p-n spoja izloženog visokom naponu. Pored toga, koristi se tehnika dodavanja zaštitnih slojeva metala iznad spojeva koji imaju za cilj osiromašenje površine sa strane poluprovodnika gde je polje veliko.

Jasno je da kada se planira da tranzistor bude korišćen kao prekidač, snaga u stanjima koja dugo traju: otvorenog prekidača (mala struja) i zatvorenog prekidača (mali napon), mora da bude smanjena. Tako, kada se razmatra stanje zatvorenog prekidača i kada je struja veoma velika, napon na tranzistoru određuje disipaciju. Suprotna je situacija kod otvorenog prekidača. Ovde je napon veliki i da bi potrošnja bila redukovana, struja treba da bude što je moguće manja. Treba imati na umu da cureća struja, pri velikim naponima, može da stvori uslove za pražnjenje odnosno proboj tranzistora.

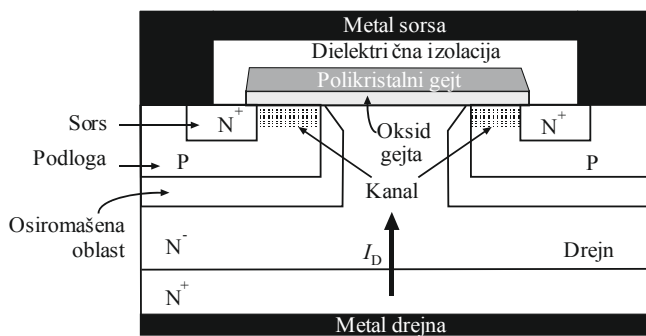
Brzo prekidanje u elektronici snage znači brzi prelazak sa jednog (nizak napon-visoka struja) na drugi (visok napon-niska struja) kraj radne karakteristike i obrnuto, a da se pri tome prolazi kroz aktivnu oblast rada tranzistora u kojoj se razvija velika snaga. To znači ta se susrećemo sa svim mogućim problemima koji su vezani za rad tranzistora snage. Pored toga, svekolike kapacitivnosti treba da se pune i prazne što utiče na brzinu rada komponente. Otuda i značaj

konstrukcije komponente. Naime, pošto je gustina struje ograničena koncentracijom nosilaca koji je formiraju, da bi se dobile veće struje, potrebna je veća površina poprečnog preseka poluprovodnika. Veća površina znači veća kapacitivnost. Time se iskazuju dva oprečna zahteva koji ograničavaju primenljivost komponente.

Među postupcima koji imaju za cilj da smanje inerciju procesa prekidanja u novije vreme srećemo tzv. HEMT tehnologiju što dolazi od High Electron Mobility Transistor – tranzistori sa velikom pokretljivošću elektrona. O njima će biti posebno reči kasnije. Pored toga biće razmotrene i pojedinosti vezane za primenu različitih materijala (Saglasno Sl. 1), a sa ciljem povećanja struje komponente.

Sledeće su komponente i njihovi modeli (dobijeni direktno od proizvođača) koji će biti korišćeni u narednim izlaganjima: Si MOS R5021AN [4], Si IGBT NGTB30N135IHRWG [5], SiC MOS C3M0065090D [6], GaN HEMT EPC2027 [7].

A. Silicijumski MOS tranzistor snage



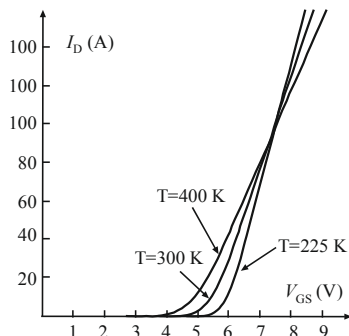
Sl. 2. Pojednostavljen poprečni presek N-kanalnog VDMOS tranzistora sa indukovanim kanalom u uslovima normalne polarizacije. Sors i podloga su kratko-spojani.

Poprečni presek Si MOS tranzistora snage prikazan je na Sl. 2. Radi se o vertikalnoj (V) dvostruko (D) difundovanoj komponenti. Kao što se vidi donja površina komponente je priključak drejna, a gornja je priključak sorsa. Ispod sorsa se razvija mreža veza koja povezuje paralelno gejtove velikog broja tranzistora i tako čini integrisano kolo koje se ponaša kao jedinstveni tranzistor.

Paralelna veza je omogućena negativnim temperaturnim koeficijentom struje drejna što se vidi iz prenosnih karakteristika datih na Sl. 3. za normalne vrednosti (iz aktivne oblasti rada) napona na drejnu.

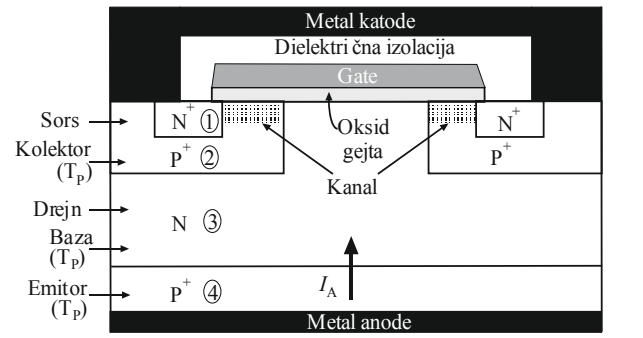
B. Silicijumski IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) je složena silicijumska komponenta koja treba da profitira od velike ulazne otpornosti MOS i malog napona zasićenja bipolarnog tranzistora (skraćeno BJT).

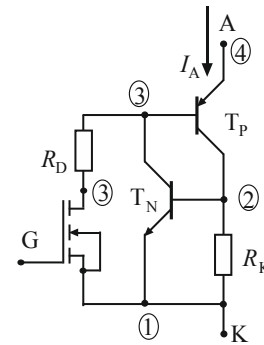


Sl. 3. Prenosne karakteristike Si MOS tranzistora snage za tri temperature

Mada je sama struktura, prikazana na Sl. 4a, veoma slična strukturi VDMOS tranzistora njegovo ekvivalentno elektronsko kolo (prikazano na Sl. 4b) je znatno složenije. Pri tome od značaja je prisustvo parazitne PNP strukture (Na Sl. 4b to je veza T_P i T_N) koja ograničava maksimalni napon.

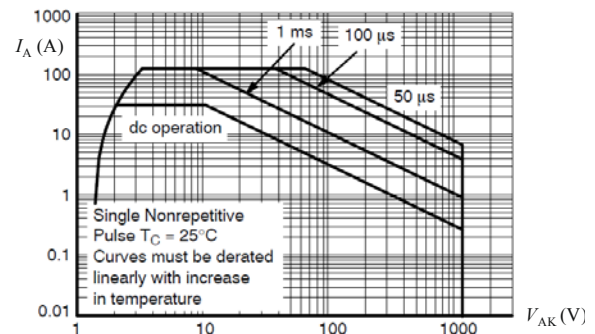


a)



b)

Sl. 4. IGBT struktura (a) i ekvivalentno kolo (b)



Sl. 5. Oblast sigurnog rada NGTB30N135IHRWG IGBT-a

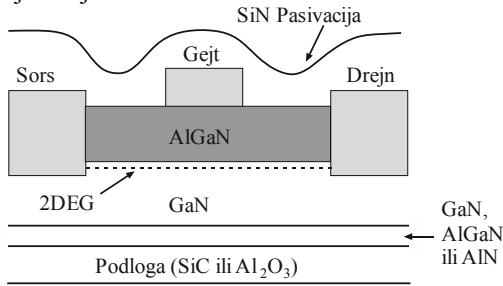
Tako, maksimalni naponi koji se postižu kod ovakvih komponenta dostižu oko 1000 V što se vidi sa Sl. 5 gde je prikazana oblast sigurnog rada NGTB30N135IHRWG IGBT-a.

Mada se može očekivati da minimalni napon IGBT bude određen veoma malim naponom zasićenja BJT-a ali, kao što se vidi sa Sl. 5, to nije slučaj. Naime, vrednost minimalnog napona, kao i kod svih snažnih komponenta, raste sa porastom struje tranzistora. Tako, za struju od 30 A, minimalni napon ovog IGBT-a je 2 V što znači da će u stanju zatvorenog prekidača da troši 60 W.

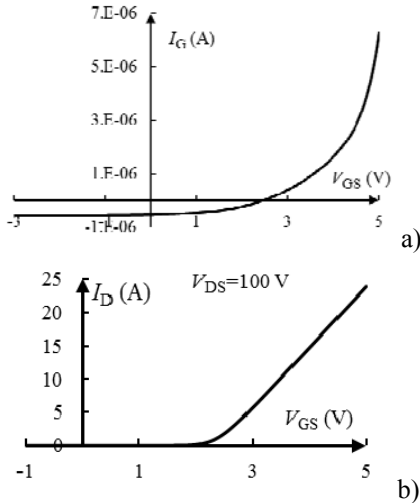
C. GaN HEMT

Specifičnost ove komponente (Poprečni presek prikazan je na Sl. 6.) je stvaranje dvodimenzionalnog elektronskog gasa ispod površine gejta što se postiže upotrebom heterospoja materijala sa različitim širinama energijskog procepa. Pokretljivost ovih elektrona je znatno veća od pokretljivosti elektrona koji nastaju termičkim generisanjem ili dopiranjem. To omogućava znatno veću brzinu uspostavljanja i

prekidanja struje tranzistora.



Sl. 6. Poprečni presek GaN HEMT-a

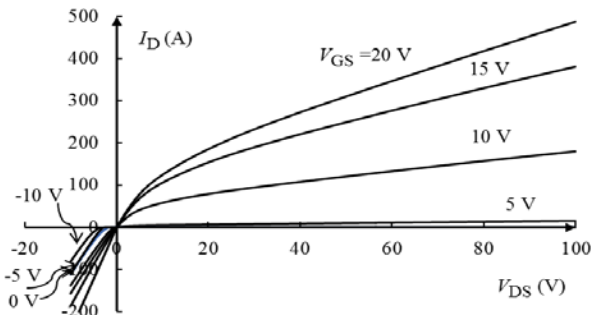


Sl. 7. Statičke karakteristike EPC2027 HEMT-a. a) Ulazna i b) Prenosna

Specifičnost ove komponente je njena ulazna karakteristika koja je prikazana na Sl. 7a. Kao što se vidi, usled naprežanja koja nastaju zbog različitih konstanta kristalnih rešetaka slojeva koji čine gejt i kanal, nastaje piezoelektrični efekt koji se ispoljava u ugrađenom naponu između gejta i podloge. Ovaj napon određuje ulaznu karakteristiku i napon praga tranzistora. Kao što se vidi, ako se prekorači napon praga počinje da teče struja gejta.

Iz prenosne karakteristike koja je prikazana na Sl. 7b može se utvrditi vrednost strmine ove komponente koja iznosi oko 10 A/V što je istog reda veličine kao i strmina Si MOS tranzistora čije su prenosne karakteristike date na Sl. 3.

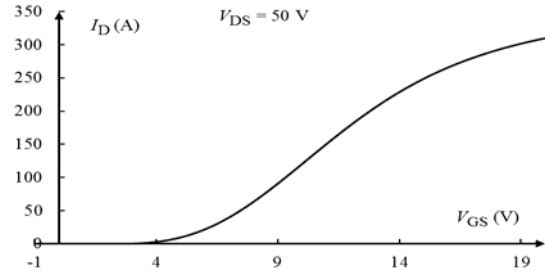
D. SiC MOS tranzistor



Sl. 8. Izlazne karakteristike C3M0065090D SiC MOS tranzistora

Konstrukcija SiC MOS tranzistora u osnovi je ista kao i konstrukcija Si MOS-a. Usled razlike u materijalima, međutim, karakteristike će se razlikovati. Sl. 8. prikazuje izlazne karakteristike C3M0065090D SiC MOS-a. Kao što se vidi ova komponenta ima relativno veliki napon praga što se može zaključiti i iz prenosnih karakteristika datih na Sl.

9. Radni parametri tranzistora, dati od strane proizvođača, su $V_{DSmax}=900\text{ V}$, $I_{Dmax}=35\text{ A}$ and $R_{DSon}=65\text{ m}\Omega$.



Sl. 9. Statička prenosna karakteristika C3M0065090D SiC MOS tranzistor

E. Uporedne osobine snažnih tranzistora

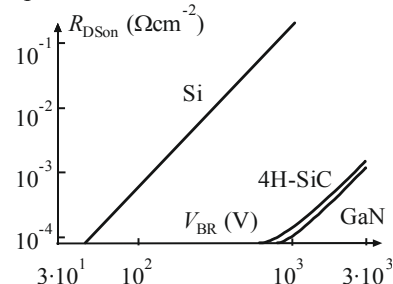
Za poređenje svojstava tranzistora snage koji su proizvedeni od različitih materijala koristićemo tri pokazatelja: kapacitivnosti tranzistora, otpornost u stanju zatvorenog prekidača (R_{DSon}) i opseg maksimalnog napona.

Biće uzeti u obzir tranzistori koji su navedeni u Tabeli II, a za koje smo SPICE [8] modele dobili od proizvođača.

TABELA II
KAPACITIVNOSTI TRANZISTORA SNAGE

Tip	C_{ISS} (pF)	C_{RSS} (pF)	C_{OSS} (pF)
SiC MOS ($V_{DS}=600\text{ V}$) C3M0065090D	660	4	60
GaN HEMT ($V_{DS}=360\text{ V}$) EPC2027	180	0.02	23
Si MOS ($V_{DS}=25\text{ V}$) R5021ANX	2300	70	1000
Si IGBT ($V_{AK}=20\text{ V}$) NGTB30N135IHRWG	5290	100	124

Razmatranjem Tabele II [9] zaključujemo da HEMT ispoljava znatno manje kapacitivnosti nego ostale komponente. S druge strane IGBT ispoljava najveću ulaznu kapacitivnost o čemu će biti posebno reči.

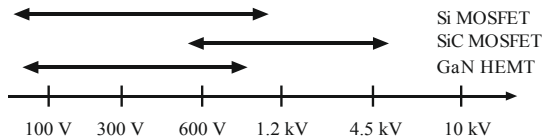


Sl. 10. R_{DSon} kao funkcija probojnog napona za tranzistore snage od Si, GaN i SiC [10].

R_{DSon} je otpornost koja se dobija kao recipročna vrednost nagiba izlazne karakteristike za datu vrednost ulaznog napona tranzistora. Manja R_{DSon} znači da će se pri istoj struji zatvorenog prekidača na komponenti razvijati manji napon. Ova otpornost, naravno, zavisi od konstrukcije komponente koja opet određuje koliki je i maksimalni napon. Poželjno je da istovremeno bude veliki maksimalni napon i mala R_{DSon} . Sl. 10. prikazuje zavisnosti ovih dveju veličina za tri materijala koji su ovde uzeti u razmatranje. Kao što se vidi, GaN ima najpovoljnije karakteristike s tim što mu je SiC veoma blizak.

Maksimalni naponi koji su primenljivi na komponentama zasnovanim na materijalima od interesa dati su na Sl. 11 [11]. Kao što se vidi, ovde prednjači SiC s tim što je HEMT

nešto malo lošiji od Si MOS-a.



Sl. 11. Mogući opsezi maksimalnih napona komponenta od Si, GaN i SiC

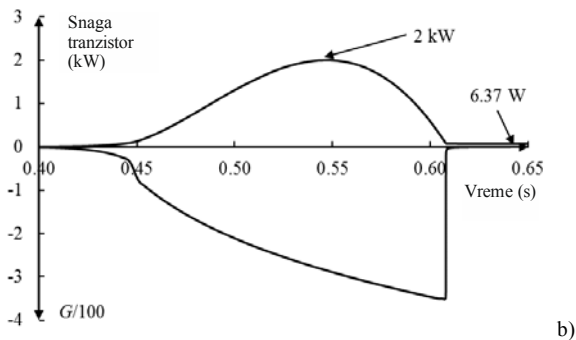
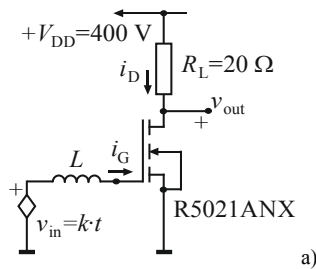
F. Snažni prekidači

Za testiranje svojstava komponenta kada se koriste kao prekidači koji prekidaju struju korišćeno je kolo sa Sl. 12a. Izabran je napon napajanja koji odgovara približnoj vrednosti amplitude faznog napona, a otpornost potrošača postavljena je tako da kada je prekidač zatvoren (sa nulnim naponom) struja iznosi 20 A.

Za analizu prekidačkih svojstava od ključnog su značaja kapacitivnosti komponenta i zato se ovde vraćamo njima. Naime, među njima od posebnog značaja je kapacitivnost C_{ISS} (ulazna kapacitivnost) zato što u sebi sadrži i Milerovu kapacitivnost C_{GD} . Da bi pokazali njen značaj odredićemo ulaznu struju koja se na nju odnosi kao

$$i_G = C_{GD} \cdot \frac{d}{dt}(v_G - v_D) = C_{GD} \cdot \frac{dv_G}{dt} \left(1 - \frac{dv_D}{dv_G}\right) = C_{GD} \cdot (1 - G) \cdot \frac{dv_G}{dt}$$

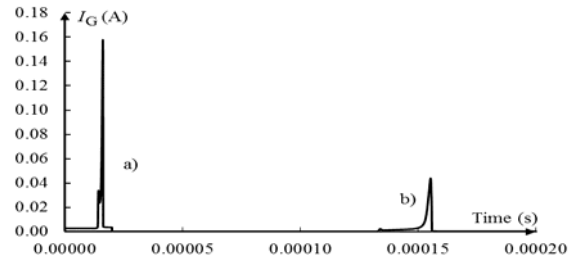
(1)



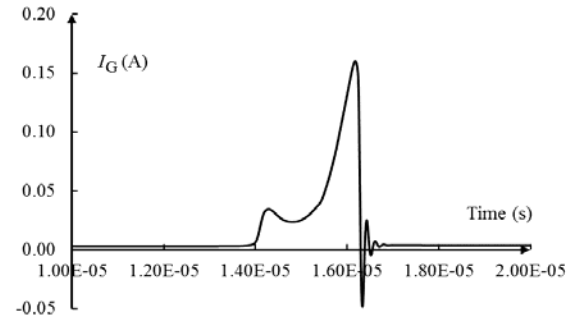
Sl. 12. Testno kolo (a) i statička (bez reaktivnih elemenata) zavisnost pojačanja (G) invertora i potrošnja snage tranzistora (b)

Gde su v_D i v_G naponi čvorova drejna i gejta, respektivno, a G je pojačanje koje je ovde negativno. Za kvantifikaciju ovog izraza razmotrićemo vrednost G . Ona veoma zavisi od ulaznog napona. Kada pratimo radnu pravu, počev od $G=0$ za $v_G < V_T$, ona prolazi kroz maksimum (za vrednosti v_G i v_D koje pripadaju aktivnoj oblasti) i pada ponovo na nulu u oblasti zasićenja. Ova zavisnost je prikazana na Sl. 12b (donja linija) za kolo sa Sl. 12a pri čemu su promene napona bile tako spore da reaktivne osobine kola i tranzistora ne dolaze do izražaja. Kao posledica ove zavisnosti, ekvivalentna kapacitivnost $C_{GD} \cdot (1 - G)$ je veoma nelinearna. Imajući sve ovo u vidu, a da bi uticaj ove kapacitivnosti učinili

vidljivim, u kolo sa Sl. 12a ugrađena je induktivnost na red sa ulaznim priključkom. Ona bi predstavljala parazitne induktivnosti uvodnika gejta tranzistora.

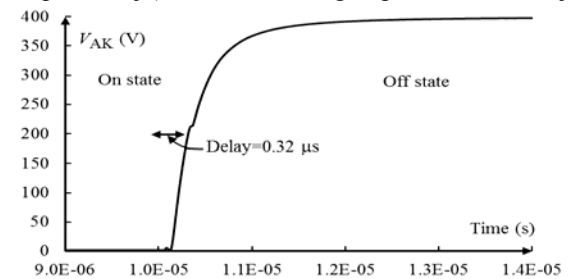


Sl. 13. Ulazna struja kola sa Sl. 12a u koje je ugrađen IGBT i sa $L = 10$ nH. Brzina porasta ulaznog napona je 500 V/ms (a) i 50 V/ms (b)

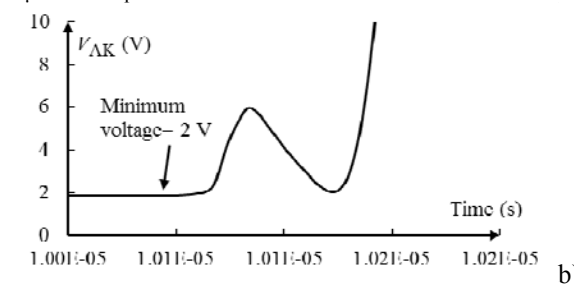


Sl. 14. Ulazna struja kola sa Sl. 12a sa IGBT-om i sa $L = 100$ nH. Brzina porasta ulaznog napona je 500 V/ms

Za analizu ponašanja prekidača korišćen je NGTB30-N135IHRWG IGBT. Odzivi ulaznog kola prikazani su na Sl. 13 i Sl. 14. Sl. 13 sadrži dva odziva pri $L = 10$ nH jedan za brzinu ulazne rampe od 500 V/ms i drugi za brzinu ulazne rampe od 50 V/ms. U oba slučaja pojavljuje se impuls ulazne struje s tim što veća brzina ulaznog signala (veća brzina prekidanja) dovodi do većeg impulsa ulazne struje.



Sl. 15. Izlazni napon pri prekidanju struje u kolu sa Sl. 12a sa IGBT-om i sa $L = 0.4$ μH. Celokupni odziv.

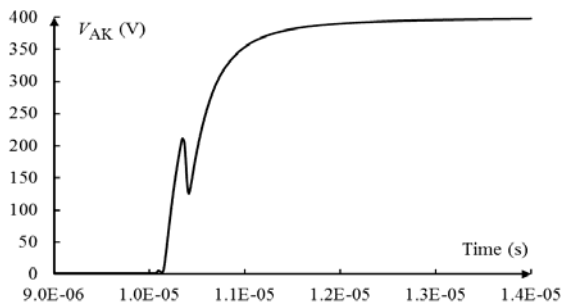


Sl. 16. Izlazni napon pri prekidanju struje u kolu sa Sl. 12a sa IGBT-om i sa $L = 0.4$ μH. Početak prelaznog režima.

Slika 14. prikazuje nešto detaljnije talasni oblik ulazne struje pri brzini ulazne rampe od 500 V/ms uz $L = 100$ nH. Dobija se impuls struje čija je amplituda skoro 0.2 A uz pojavu oscilacija koje mogu da se preslikaju u izlazni signal.

Za većinu primena od interesa je primena za prekidanje (isključivanje) izlazne struje. Rezultati simulacije za $L = 0.4$ μH prikazani su na Sl. 15 (za ceo odziv izlaznog napona) i na Sl. 16 za jedan njegov deo. Može se pročitati kašnjenje

od oko 300 ns. U provodnom stanju napon na drejnu je bio sveden na 2 V. Kada se L poveća za 25% pojavljuju se značajna izobličenja što se vidi sa Sl. 17. Za još veće vrednosti L nastaje dugačka povorka oscilacija.



Sl. 17. Izlazni napon pri prekidanju struje u kolu sa Sl. 12a sa IGBT-om i sa $L=0.5 \mu\text{H}$.

TABELA III
POREĐENJE OSOBINA TRANZISTORA SNAGE KAO PREKIDAČA

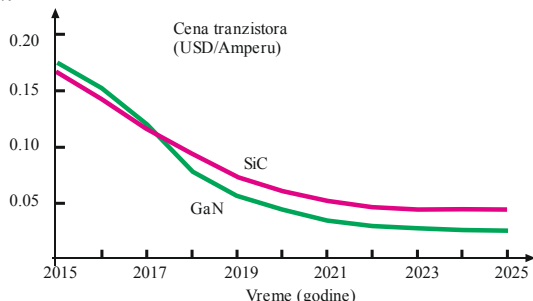
Komponenta	Srednja snaga po tranzistoru u provodnom stanju	Vreme isključivanja tranzistora	Uticao redne induktivnosti na vreme isključivanja
Si MOSFET	20 W	300 ns	Mali
GaN HEMT	125 W	8 ns	Vrlo eliki
SiC MOSFET	10 W	35 ns	Veliki
Si IGBT	12.5 W	200 ns	Vrlo veliki

G. Poređenje snažnih prekidača

Za poređenje prekidača realizovanih u različitim tehnologijama koristićemo Tabelu III. koja je nastala sistematskim simulacijama i analizom rezultata. Ona pokazuje da SiC MOSFET ima najmanju potrošnju u provodnom stanju što je lako praćeno od strane IGBT-a. Najbrži je GaN HEMT s tim što SiC MOSFET ne zaostaje znatno. Uticaj parazitnih induktivnosti (montaže) je najizraženiji kod HEMT-a, a Si MOSFET je najmanje osetljiv na ove vrste smetnji.

Gornji zaključci treba da se relativizuju s obzirom na radne uslove koji su gore (Sl. 12a) bili postavljeni. Naime, ako se razmatraju primene u kojima je napon koji se prekida preko 600 V (Videti Sl. 11) SiC MoSFET je jedino rešenje.

Da bi se donela konačna odluka o tome koja je komponenta najpovoljnija za datu primenu potrebno je uzeti u obzir niz elemenata među kojima svakako: cenu; pouzdanost; raspoloživost; brzinu; maksimalni napon i maksimalnu struju.



Sl. 18. Tekuće i predviđene cene komponenata sa širokim energijskim procepom

Primera radi na Sl. 18 [12] prikazane su tekuće i predviđene cene ŠEP komponenata. Može se izračunati da komponenta sa maksimalnom strujom od 100 A je u 2015 god koštala oko 17 USD. Predviđanja su da će cene padati ali se ne očekuje da će pasti ispod 0.3 USD/Amperu. Ove vrednosti su iznad tekućih cena Si MOSFET-a i IGBT-a.

IV. ZAKLJUČAK

Razmotrena je primena materijala sa velikim energijskim procepom za primene u elektronskim prekidačima velikih snaga. Ustanovljene su uporedne osobine komponenta koje treba da projektantu olakšaju izbor. Pokazuje se da komponente sa širokim energijskim procepom imaju posebne prednosti u odnosu na Si. Tako, SiC MOSFET može da iznese znatno veće napone i da pri tome disipira manju snagu u stanju provođenja, a GaN HEMT je najbrži u ulozi prekidača velikih struja.

ZAHVALNICA

Ova istraživanja su delimično finansijski podržana od strane MPNiTR u okviru projekta TR32004.

LITERATURA

- [1] Mastro, M., "II-V Compound Semiconductors: Integration with Silicon-Based Microelectronics", in: Li, T., Mastro, M., Dadgar, A., editors, "Fundamentals and the Future of Semiconductor Device Technology", CRC Press, 2011.
- [2] Sze, S.M., and Ng, K.K., "Physics of semiconductor devices", John Wiley and Sons Inc., Hoboken, NJ, 2007.
- [3] Kubat, M., "Power semiconductors", Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [4] -, <http://www.rohm.com/web/eu/search/parametric/search/MOSFETs?gclid=CO3>
- [5] -, http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/ngtb30n135ihr-d.pdf
- [6] -, <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/Power/Data%20Sheets/C3M0065090J.pdf>
- [7] -, <http://epc-co.com/epc/DesignSupport/DeviceModels.aspx>
- [8] Nagel, L. W., "SPICE2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits", EECS Dept. Uni. of California, Berkeley, Technical Report No. UCB/ERL M520, 1975.
- [9] Li, K., "Wide Bandgap (SiC/GaN) Power Devices Characterization and Modeling: Application to HF Power Converters", Ph.D. Thesis at: Université Lille 1 - Sciences et Technologies, École Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, 2014.
- [10] Bahat-Treidel, E., "GaN-based HEMTs for High Voltage Operation: design, technology and characterization", Göttingen: Cuvillier, 2012
- [11] Araújo, S. V., "On the Perspectives of Wide-Band Gap Power Devices in Electronic Based Power Conversion for Renewable Systems", Kassel University Press, 2013
- [12] Plissonnier, M., "GaN Technology for Power Electronics Applications", Innovation for the future Conference, Oct. 2015, Tokyo. www.leti.cea.fr/fr/.../C2-Marc_PLISSONNIER-GaN_Technology.pdf

ABSTRACT

Semiconductor materials with broad band-gap such as GaN and SiC may be found in electronic devices more and more often. That is especially the case when switching devices intended to be used in modern power electrical systems are considered. The analysis of the materials and the proper components in power electronics is of crucial importance for economic design of modern power electricity systems based on classical and renewable energy sources. We will here produce comparisons of the material as well as component properties which will enable to come with fundamental information for their behavior as high power switches. Besides the classical silicon based components such as the MOS and IGBT transistors, components based on GaN (HEMT) and SiC (MOS) will be considered.

Materials with broad band gap implemented in power electronics

Jelena Milojković, Vančo Litovski