Mgr inż. Krystian KRÓL [1,2]
Mgr inż. Andrzej TAUBE[2]
Dr inż. Mariusz SOCHACKI[2]
Prof. dr hab. inż. Jan SZMIDT[2]
1 – Instytut Tele- i Radiotechniczny
2 – Instytut Mikro- i Optoelektroniki Politechnika Warszawska

ANALIZA WPŁYWU WYBRANYCH ASPEKTÓW TECHNOLOGII WYKONANIA TRANZYSTORA MOSFET NA KRYTYCZNE PARAMETRY UŻYTKOWE

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę numeryczną wpływu wybranych procesów technologicznych na krytyczne parametry użytkowe n-kanałowego tranzystora DIMOSFET opartego o materiał szerokopasmowy – węglik krzemu 4H-SiC. Analizie poddano wpływ procesów implantacji obszarów warstwy dryftu oraz implantacji obszarów wysp typu p na napięcie krytyczne $U_{ds\ max}$ oraz charakterystyki wyjściowe i przejściowe przyrządu. Parametry te definiują praktyczną użyteczność przyrządu w przypadku zastosowania materiału w przyrządach mocy.

THE ANALYSIS OF MOSFET MANUFACTURING TECHNOLOGY ASPECTS ON CRITICAL APPLICATION PROPERTIES

Abstract: This work presents a numerical analysis of the influence of the chosen critical technology processes on critical application parameters of n-channel DIMOSFET transistor manufactured on 4H-SiC widebandgap semiconductor. Presented analysis concerns the impact of drift layer and p-well implantation processes on breakdown voltage $U_{ds\ max}$, transient and output characteristics. These parameters are most important for practical implementation of SiC MOSFET as a power device.

Słowa kluczowe: węglik krzemu, tranzystor MOS, modelowanie technologii
Keywords: silicon carbide MOS transistor, modeling technology

1. WPROWADZENIE

We współczesnej elektronice coraz większą rolę odgrywają nowe materiały półprzewodnikowe, które w wielu dziedzinach wypierają stosowany do tej pory krzem. W przypadku przyrządów przeznaczonych do pracy z wysokimi mocami szczególną rolę odgrywają materiały szerokopasmowe, w szczególności węglik krzemu (SiC). Cechuje się on około dziesięciokrotnie większym niż krzem polem krytycznym, a także możliwością pracy w wysokich temperaturach nieosiągalnych dla konwencjonalnych tranzystorów krzemowych, posiada jednocześnie stosunkowo wysoką ruchliwość nośników [1]. Przekłada się to bezpośrednio na wartość napięcia blokowania tranzystora, która jest jednym z najbardziej krytycznych parametrów tranzystorów w zastosowaniu jako przełącznik w układach mocy.

SiC posiada również korzystne właściwości technologiczne pozwalające na stosunkowo prostą adaptację do linii technologicznych przeznaczonych do produkcji przyrządów krzemowych.

Dzięki możliwości pracy z większymi napięciami dren–źródło w stanie wyłączenia tranzystora przy zastosowaniu nowych konstrukcji możliwe jest nie tylko zwiększenie napięcia pracy przyrządu, lecz także zmniejszenie pojemności wejściowych, co pozwala na jego pracę z większymi częstotliwościami przełączania. Przykładowo dzięki tym właściwościom, w przypadku wykorzystania tranzystorów MOSFET wykonanych na węgliku krzemu w układach przetwornic energii o mocy wyjściowej rzędu kilku kilowatów, uzyskuje się sprawności sięgające 98.8-99% [2] [3].

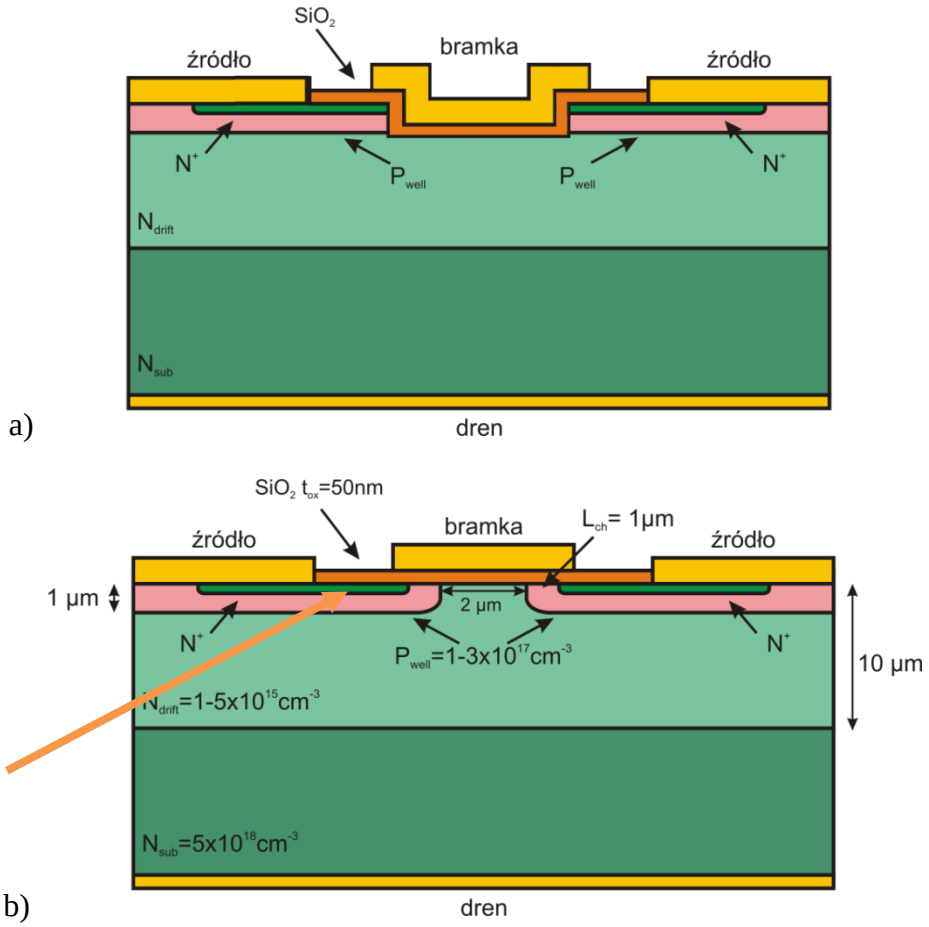
Jednak szczególne właściwości fizyczne materiałów szerokopasmowych powodują, że aby w pełni wykorzystać korzyści płynące z ich zastosowania, konieczne jest zaprojektowanie konstrukcji przyrządów odmiennej od stosowanej typowo w procesie technologii krzemowej. Ponieważ technologia materiałów szerokopasmowych jest stosunkowo droga i długotrwała, rodzi to szereg problemów projektowych i symulacyjnych związanych z koniecznością takiego zaprojektowania geometrii i parametrów przyrządu, aby zapewnić maksymalne wykorzystanie cech używanego materiału. Mimo że w przypadku przyrządów mikroelektronicznych jest możliwe przeprowadzenie prostych symulacji opartych wyłącznie o wymiary geometryczne bazujących na metodzie elementów skończonych, to podejście takie skutkuje otrzymaniem wyników obarczonym dużym błędem. Dzieje się tak, ponieważ bardzo silny wpływ na parametry przyrządu ma nie tylko jego budowa geometryczna, lecz także rodzaje i parametry procesów technologicznych prowadzących do jego wytworzenia i wpływających na właściwości materiałowe elementów przyrządu oraz właściwości między powierzchniami, które mają istotny wpływ na parametry końcowe.

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki analizy symulacyjnej wpływu dozy implantacji obszarów warstwy dryftu oraz obszarów wysp w konstrukcji n-kanałowego tranzystora DIMOSFET na krytyczne parametry przyrządu, jakimi są napięcie przebicia (maksymalne napięcie blokowania dren-źródło) oraz charakterystyki przejściowe i wyjściowe.

2. KONSTUKCJA TRANZYSTORA DIMOSFET

W przypadku przyrządów mocy tranzystory MOSFET realizuje się zazwyczaj jako tranzystory wertykalne. Typowa konstrukcja tranzystora mocy stosowana w przyrządach krzemowych pokazana jest na rys. 1a. Jest to tranzystor UMOSFET. Niestety konstrukcja taka nie nadaje się do zastosowania w przypadku węglika krzemu. Wynika to z właściwości SiC, którego wartość pola krytycznego powodującego jonizację lawinową jest ok. 10-krotnie większa niż analogiczna wartość dla krzemu. Dlatego też w konstrukcji przedstawionej na rys. 1a, ze względu na skomplikowany kształt bramki przyrządu w obszarach zagięcia bramki (zaznaczonych na rys. 1a strzałką), następuje zagęszczenie linii pola elektrycznego powodujące występowanie w tym miejscu bardzo dużych wartości pola. Skutkuje to bardzo niebezpiecznym z aplikacyjnego punktu widzenia przebiciem dren–źródło. Stąd też konstrukcje tego typu cechują się napięciem blokowania o ok. 40% mniejszym niż teoretycznie możliwe do osiągnięcia.

Aby wyeliminować problem związany z przebiciem dielektryka bramkowego, stosuje się konstrukcję pokazaną na rys. 1b tranzystora DIMOSFET (ang. Double Implanted MOSFET), która dzięki wyeliminowaniu narożników w budowie bramki pozwala na osiągnięcie większych napięć przebicia. Dodatkową zaletą tego typu konstrukcji jest zmniejszenie prądów upływności w stanie blokowania tranzystora.



Rys. 1. Konstrukcje typowych tranzystorów mocy MOSFET:
a) tranzystor UMOSFET, b) tranzystor DIMOSFET. Na rysunku (b) podano parametry symulowanego w pracy tranzystora

Jednak nawet w zoptymalizowanej konstrukcji osiągana wartość napięcia przebicia silnie zależy od parametrów procesów implantacji obszarów warstwy dryftu oraz obszaru wyspy przekładających się na rozkład i koncentrację wprowadzonych domieszek (parametry te oznaczono na rys. 21b odpowiednio dla obszaru dryftu i wyspy jako N_{drift} oraz P_{well}). Na rys. 1b podano parametry konstrukcyjno-materiałowe symulowanego tranzystora n-kanałowego DIMOSFET wraz zakresem symulowanych koncentracji domieszkowania obszarów warstwy dryftu i wyspy uzyskanych metodą implantacji jonowej.

3. METODYKA SYMULACJI PRZEBICIA SKROŚNEGO

Do obliczenia wydajności generacji nośników w trakcie jonizacji zderzeniowej posłużono się modelem Selberherra [4], gdzie wydajność wyraża się wzorem:

$$G = \alpha_n n\, v_n + \alpha_p p\, v_p. \tag{1}$$

Gdzie: n oraz p są koncentracjami nośników, v_n oraz v_p są prędkościami unoszenia elektronów i dziur, natomiast α_n i α_p to współczynniki jonizacji zderzeniowej opisane zgodnie z zależnością podaną przez Chynowetha [5]:

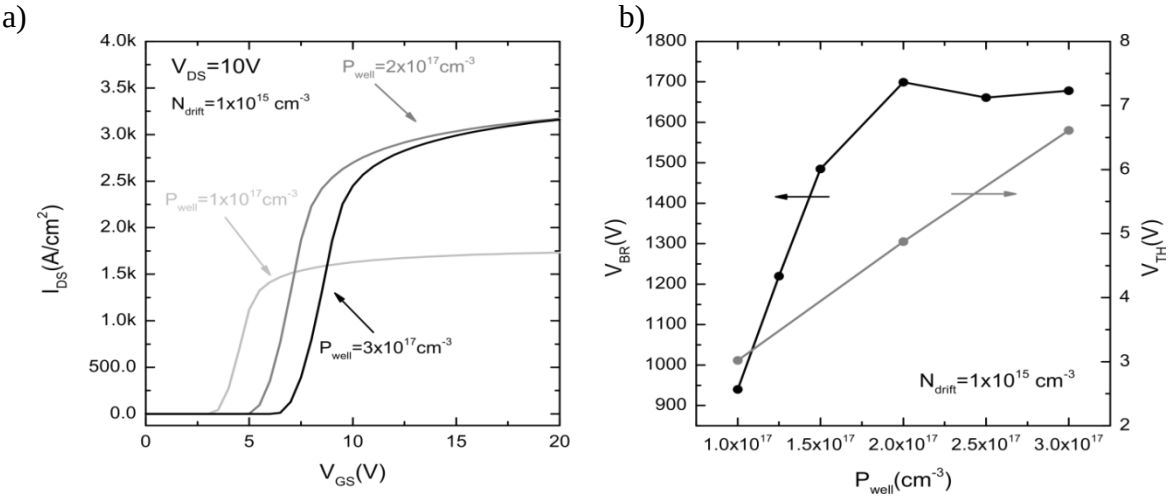
$$\alpha_n = 7{,}26 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{2{,}34 \cdot 10^7}{E}\right), \tag{2}$$

$$\alpha_p = 6{,}85 \cdot 10^6 \cdot \exp\left(-\frac{1{,}41 \cdot 10^7}{E}\right). \tag{3}$$

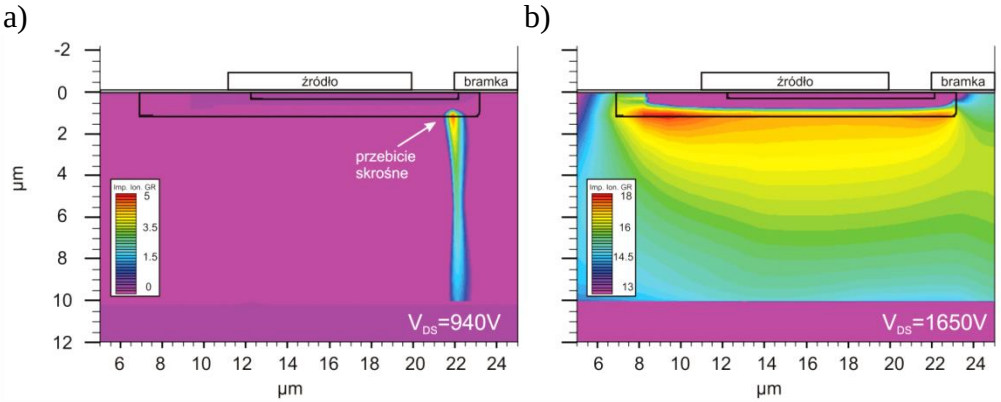
Gdzie E jest wartością natężenia pola elektrycznego podaną w V/cm.

4. WYNIKI SYMULACJI

Jako pierwszy symulowano wpływ domieszkowania obszaru wyspy na wartość napięcia progowego (V_{th}) oraz napięcia przebicia tranzystora (V_{BR}). Uzyskane wyniki pokazano na rys. 2. Wraz ze wzrostem domieszkowania obszaru wyspy wzrasta maksymalna gęstość prądu drenu osiągana przez tranzystor oraz wartość pola krytycznego. Jednocześnie jednak wzrasta napięcie progowe tranzystora. Pokazany na rys. 2b wzrost wartości napięcia przebicia spowodowany zmianą domieszkowania obszaru wyspy wynika ze zmiany mechanizmu przebicia złącza dren–źródło z punktowego na obszarowy (na całej długości złącza) tak jak pokazano to na rys. 3.

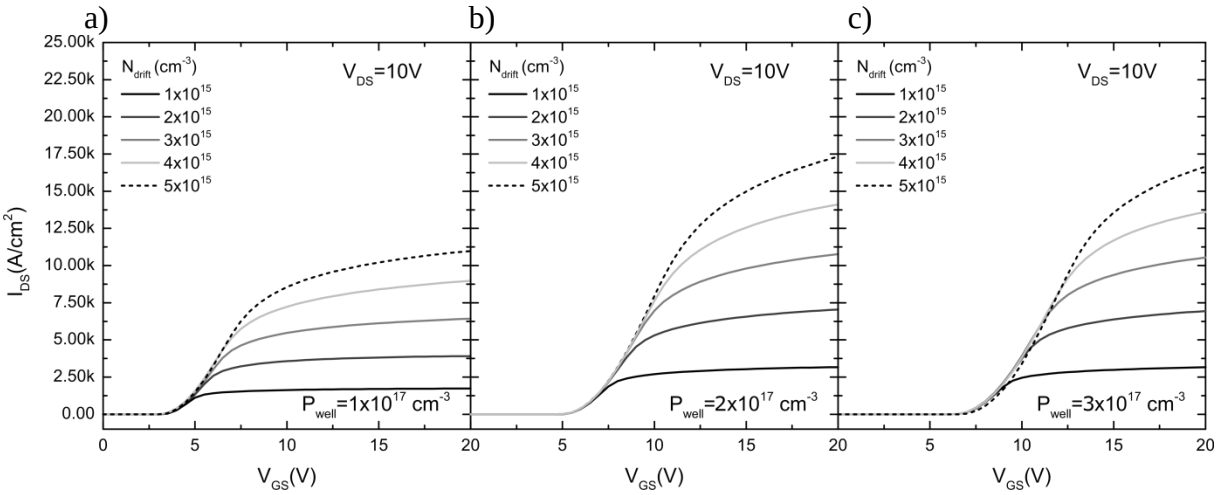


Rys. 2. Rodzina charakterystyk przejściowych dla różnych wartości domieszkowania obszaru wyspy (a) oraz charakterystyki napięcia przebicia i napięcia progowego w funkcji poziomu domieszkowania obszaru wyspy (b)



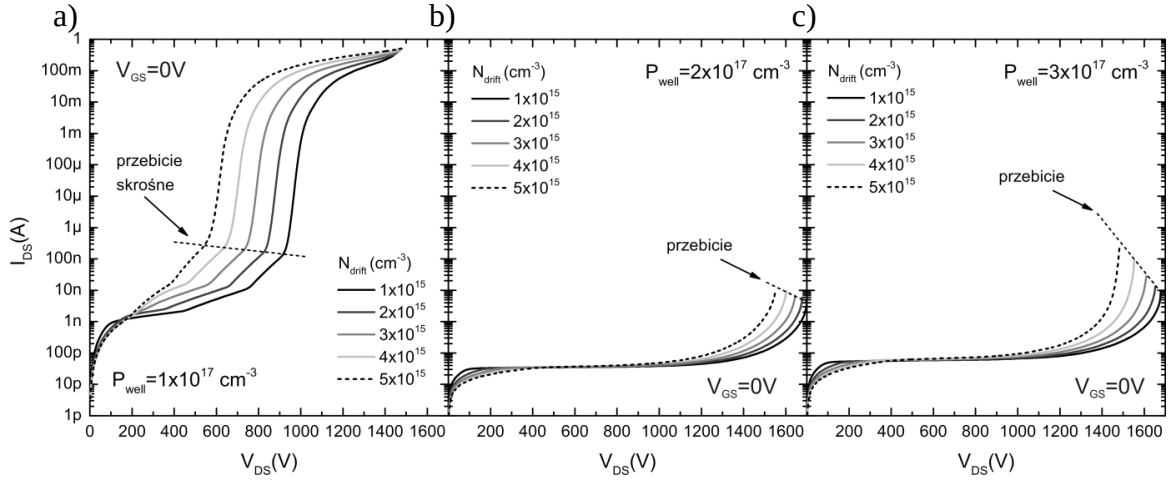
Rys. 3. Rozkład szybkości generacji nośników – ilustracja mechanizmu przebicia skrośnego złącza dren–źródło dla niskiego poziomu domieszkowania wyspy $P_{well} = 1 \cdot 10^{17}$ – przebicie punktowe (a) oraz dla poziomu domieszkowania wyspy $P_{well} = 3 \cdot 10^{17}$ – przebicie obszarowe (b)

Od poziomu domieszkowania obszaru wyspy zależą również charakterystyki przejściowe tranzystora. Dlatego też poddano je symulacjom dla trzech rozważanych wartości koncentracji domieszki wyspy w funkcji poziomu domieszkowania obszaru dryftu (N_{drift}). Wyniki na rys. 4 wskazują, że zwiększenie domieszkowania poziomu wyspy do wartości wyższej niż $2 \cdot 10^{17}$ at/cm^3 wpływa korzystnie również na maksymalną wartość prądu drenu, choć wiąże się to ze zwiększeniem napięcia progowego. Pod względem zdolności tranzystora do wysterowania napięciem bramki nie obserwuje się już istotnej różnicy w uzyskiwanych wartościach prądów drenu w stanie nasycenia dla wyższych koncentracji domieszki.



Rys. 4. Charakterystyki przejściowe tranzystora dla domieszkowania wyspy $P_{well} = 1 \cdot 10^{17}$ (a) $P_{well} = 2 \cdot 10^{17}$ (b) $P_{well} = 3 \cdot 10^{17}$ (c). Parametrem jest poziom domieszkowania obszaru dryftu

Jak opisano w rozdziale 2, ostatnim z istotnych parametrów tranzystora ze względu na zastosowanie jako przyrząd mocy jest wielkość prądu upływu dren–źródło przy wyłączonym tranzystorze. W przeprowadzonych symulacjach przyjęto U_{gs} na poziomie 0 V. Uzyskane charakterystyki Ids(V_{ds}) dla wyłączonego tranzystora pokazano na rys. 5. Również pod tym względem domieszkowanie wyspy na poziomie $1 \cdot 10^{17}$ at/cm^3 jest niekorzystne ze względu na znaczne prądy upływności występujące przy wyższych napięciach U_{ds}. Dla typowego przyrządu mocy charakterystyka pokazana na rys. 5a jest niedopuszczalna, ponieważ w układach przetworników mocy tranzystor pracuje jako klucz, co oznacza, że w stanie wyłączenia musi mieć możliwość blokowania napięcia z praktycznie zerowym prądem upływności. Natomiast już dwukrotna zmiana poziomu domieszkowania obszaru wyspy powoduje, że ta sama konstrukcja przyrządu cechuje się bardzo dobrymi parametrami upływnościowymi. Zauważalny wzrost prądu upływności obserwuje się tylko dla napięć bliskich napięciu przebicia i utrzymuje się on na poziomie dziesiątek nanoamperów. Dalsze zwiększenie poziomu domieszkowania nie powoduje już zmian kształtu charakterystyk upływnościowych tranzystora w stanie blokowania, ale zwiększa wartość prądów I_{ds} przy wysokich napięciach U_{ds}. Również zbyt wysoki poziom domieszkowania obszaru wyspy wpływa niekorzystnie pod tym względem na właściwości tranzystora DIMOSFET, ponieważ w typowych zastosowaniach pracuje on właśnie z napięciami z zakresu ok. 1,0-1,5 kV.



Rys. 5. Charakterystyki $I_{ds}(U_{ds})$ dla różnych wartości domieszkowania obszaru wyspy (P_{well}) i obszaru dryftu (N_{drift}). $P_{well} = 1 \cdot 10^{17}$ (a) $P_{well} = 2 \cdot 10^{17}$, (b) $P_{well} = 3 \cdot 10^{17}$ (c)

5. PODSUMOWANIE

W pracy pokazano, jak istotny wpływ na parametry przyrządu mają nie tylko właściwości konstrukcyjne tranzystora MOSFET, lecz także parametry technologiczne. W przypadku konstrukcji tranzystora DIMOSFET wykonanego na węgliku krzemu jednym z najistotniejszych parametrów technologicznych wpływającym bezpośrednio na jego działanie i charakterystyki jest poziom domieszkowania obszarów wyspy i warstwy dryftu. Dla zaproponowanej w pracy konstrukcji tranzystora szczególnie istotny jest poziom domieszkowania obszaru wyspy, ponieważ, jak wykazano, już dwukrotna zmiana koncentracji domieszki z poziomu $1 \cdot 10^{17}$ at/cm^3 do $2 \cdot 10^{17}$ at/cm^3 wpływa korzystnie na wiele najistotniejszych parametrów tranzystora, takich jak: prąd drenu w stanie nasycenia, prądy upływności w stanie blokowania, napięcie przebicia (i wynikające z tego maksymalne napięcie blokowania), odbywa się to jednak kosztem wzrostu napięcia progowego przyrządu. Dalsze zwiększanie poziomu domieszkowania wyspy nie jest jednak celowe ze względu na wzrost prądów upływności tranzystora w stanie blokowania dla wyższych napięć U_{ds}. Równie silny wpływ na charakterystyki wyjściowe tranzystora ma poziom domieszkowania warstwy dryftu. Wszystkie przedstawione wyniki zależą wyłącznie od parametrów materiałowych elementów przyrządu, a nie jego konstrukcji.

PODZIĘKOWANIE

Praca współfinansowana ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.



LITERATURA

[1] Ryu S., Krishnaswami S., Hull B., Heath B., Das M., Richmond J., Fatima H., Zhang J., Agarwal A., Palmour J., Lelis A., Geli B., Katsis D., Scozzie C. i Scofield J.: *High Speed Switching Devices in 4H-SiC – Performance and Reliability*, w *Preceedings of International Semiconductor Device Research Symposium*, Baltimore, 2005.

[2] Stupar A., Friedli T., Miniböck J., Schweizer M. i Kolar J.W.: *Towards a 99% efficient three-phase buck-type PFC rectifier for 400 V DC distribution systems*, w *Proceeding of XXVI IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Zurich, 2011.

[3] Fan X., Ben G., Tolbert L.M., Wang F. i Blalock B.: *Evaluation of SiC MOSFETs for a high efficiency three-phase buck rectifier*, w *Proceeding of XXVII Annual IEEE Applied Power Electronics Conerence and Exposition*, Orlando, 2012.

[4] Selberherr S.: *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*, Springer-Verlag, 1984.

[5] Chynoweth A.G.: *Ionization Rates for Electrons and Holes in Silicon*, "Physical Review", tom 109, p. 1537, 1958.