

Modelowanie normalnie wyłączonych tranzystorów MOS-HEMT AlGaIn/GaN

Andrzej Taube^{1,2*}, Mariusz Sochacki², Jan Szmidt², Eliana Kamińska¹, Anna Piotrowska¹

powerHEMT

¹Instytut Technologii Elektronowej, al.Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

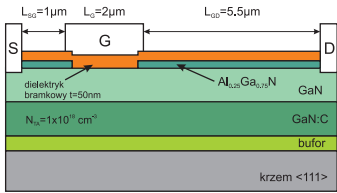
²Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Politechnika Warszawska, ul.Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

*ataube@ite.waw.pl

Motywacja

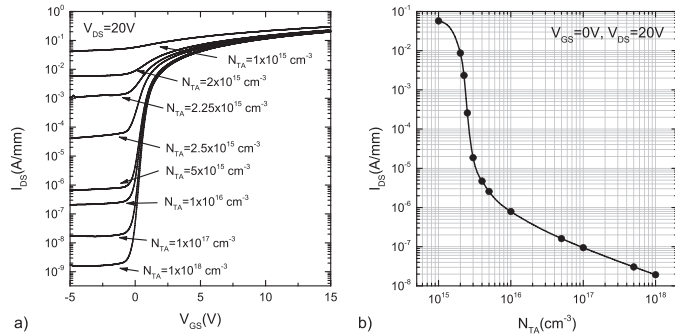
Tranzystory HEMT na bazie heterostruktury AlGaIn/GaN ze względu na doskonałe parametry elektro-fizyczne materiałów z grupy III-N mogą zostać wykorzystane jako podstawowy element półprzewodnikowych układach elektroniki mocy. Szczególnie atrakcyjne wydaje się być zastosowanie krzemu jako materiał podłożowego do wzrostu struktur tranzystorowych AlGaIn/GaN, co pozwala na uzyskanie dobrej jakości warstw epitaksjalnych, przy jednoczesnej niskiej cenie i dostępności podłożu o dużej średnicy (6 cali). Jednym z podstawowych wymagań stawianych tranzystorom przeznaczonym do tych zastosowań jest normalnie wyłączony tryb pracy z kanałem indukowanym. Konwencjonalna struktura tranzystorów HEMT AlGaIn/GaN nie nadaje się do bezpośredniego zastosowania w tranzystorach mocy z uwagi na fakt pracy w trybie normalnie włączonym, z powodu silnego efektu piezoelektrycznego. Wśród rozwiązań jedynie zastosowanie struktury typu MOS-HEMT potencjalnie pozwala na osiągnięcie wysokiej wartości napięcia progowego powyżej 1V oraz niskiej wartości prądu bramki w stanie włączenia i wyłączenia tranzystora. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki modelowania i symulacji charakterystyk elektrycznych tranzystora MOS-HEMT AlGaIn/GaN.

Struktura Tranzystora



- podłoże Si <111>
- grubość wysokorozystywnej warstwy GaN:C 2.5µm
- grubość warstwy kanału GaN - 500nm
- grubość warstwy barierowej Al_{0.2}Ga_{0.8}In - 25nm
- dielektryk podbramkowy - SiO₂ (t=50nm, ε=3.9)
- ruchliwość nośników w kanale pod bramką MIS - 200 cm²/Vs, ruchliwość 2DEG - 1500 cm²/Vs
- rezystancja kontaktów omowych źródła i drenu- 0.6Ωmm
- długość bramki L_g=2µm, odległość źródło-bramka L_{sd}=1µm oraz bramka-dren L_{sd}=5.5 µm

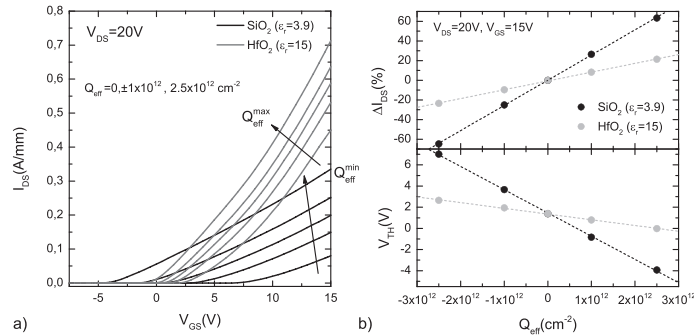
Wpływ koncentracji domieszki akceptorowej w warstwie GaN:C na prąd upływu tranzystora MOS-HEMT



Zależność a) charakterystyk przejściowych tranzystora MOS-HEMT oraz b) wartości prądu w stanie wyłączenia (V_{gs}=0V, V_{ds}=20V) od koncentracji atomów węgla w warstwie GaN:C

- dla koncentracji C=1x10¹⁶ cm⁻³ prąd upływu jest na poziomie nA/mm
- spadek koncentracji C do poziomu ok. 5x10¹⁵ cm⁻³ - podwyższenie prądu upływu do poziomu µA/mm
- dla koncentracji C=1x10¹⁵ cm⁻³ nie jest możliwe zamknięcie tranzystora - prąd upływu wynosi ok. 50mA/mm

Wpływ względnej przenikalności elektrycznej dielektryka bramkowego na parametry tranzystora MOS-HEMT



Zależność a) charakterystyk przejściowych oraz b) zmiany wartości prądu w stanie włączenia (V_{gs}=15V, V_{ds}=20V) i napięcia progowego od wartości gęstości ładunku efektywnego w dielektryku dla ε_{SiO2}=3.9 i ε_{HfO2}=15.

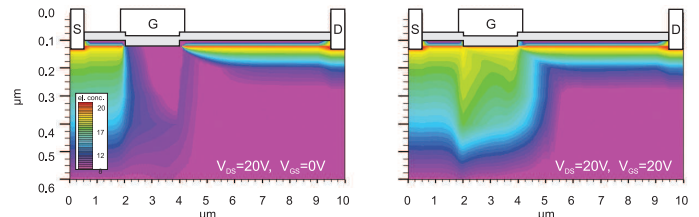
- zastosowanie dielektryków high-k (np. HfO₂ ε=15-20) - lepsza modulacja nośników w kanale tranzystora
- zwiększenie ε z 3.9 do 15 - I_{ds,max} (V_{gs}=15V, V_{ds}=20V) wzrósł z 0.2 A/mm do 0.58 A/mm
- wysoka wartość ε, zmniejszenie wpływu Q_{eff} na charakterystyki i parametry elektryczne tranzystora
- Q_{eff}=1x10¹² cm⁻² - w przypadku SiO₂ V_{th}=-0.83V, dla HfO₂ V_{th}=-0.78V

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki modelowania charakterystyk normalnie wyłączonych tranzystorów MOS-HEMT AlGaIn/GaN.

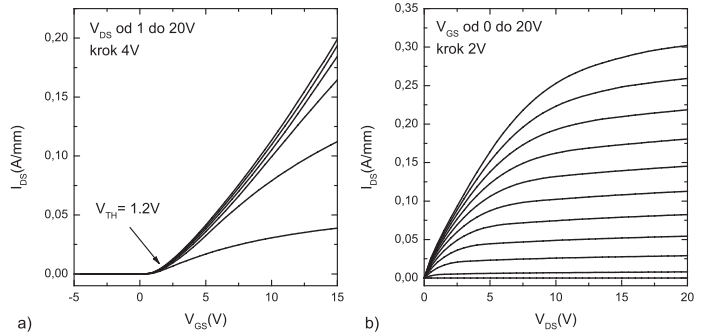
- Założona konstrukcja tranzystora charakteryzowała się napięciem progowym o wartości V_{th}=1.39V.
- Maksymalny prąd w stanie włączenia na poziomie 0,3 A/mm.
- Dla zapewnienia niskiej wartości prądu upływu koncentracja węgla powinna wynosić powyżej 5x10¹⁵ cm⁻³.
- Wskazano ograniczenia maksymalnego prądu w stanie włączenia związane z niską ruchliwością nośników w kanale tranzystora.
- Określono wpływ zastosowania dielektryków high-k w konstrukcji normalnie wyłączonych tranzystorów MOS-HEMT, który manifestował się zwiększeniem maksymalnego prądu w stanie włączenia i zmniejszenia negatywnego wpływu ładunku zgromadzonego w warstwie dielektryka na napięcie progowe.

Wyniki symulacji charakterystyk elektrycznych tranzystora MOS-HEMT AlGaIn/GaN.



Rozkład koncentracji elektronów w tranzystorze MOS-HEMT AlGaIn/GaN w stanie wyłączenia (V_{gs}=0V, V_{ds}=20V) oraz włączenia (V_{gs}=20V, V_{ds}=20V)

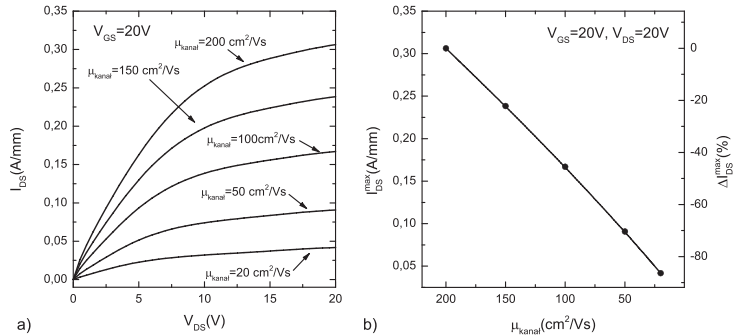
- wytrawienie warstwy Al_{0.2}Ga_{0.8}In pod kontaktem bramki powoduje zubożenie 2DEG dla zerowego napięcia V_{gs}
- przyłożenie dodatniego napięcia V_{gs} powoduje włączenie tranzystora i utworzenie kanału



Rodzina charakterystyk a) przejściowych oraz b) wyjściowych tranzystora MOS-HEMT AlGaIn/GaN.

- napięcie progowe (V_{th}) dla symulowanej struktury tranzystora MOS-HEMT wynosiło 1.39V
- maksymalna wartość prądu drenu w stanie włączenia tranzystora I_{ds,max} (V_{gs}=20V, V_{ds}=20V) wynosiła ok. 0.3 A/mm

Wpływ ruchliwości w kanale na parametry tranzystora MOS-HEMT



Zależność a) charakterystyk wyjściowych tranzystora MOS-HEMT oraz b) wartości prądu w stanie włączenia (V_{gs}=20V, V_{ds}=20V) od ruchliwości nośników w kanale tranzystora.

- wartości ruchliwości w normalnie wyłączonych tranzystorach MOS-HEMT AlGaIn/GaN < 200 cm²/Vs
- problem - duża chropowatość powierzchni, duża gęstość stanów pułapkowych na granicy dielektryk/GaN
- wraz ze spadkiem ruchliwości z 200 do 20 cm²/Vs maksymalny prąd w stanie włączenia spada o ponad 80% do wartości poniżej 0.05 A/mm, aby uzyskać prąd I_{ds} > 200mA/mm ruchliwość musi być większa niż 120 cm²/Vs

XIII Krajowa Konferencja Elektroniki, Dartówko Wschodnie, 9-13.06.2014



www.ite.waw.pl/powerhemt

