

## Wpływ procesów utleniania i wygrzewania w atmosferze zawierającej fosfor lub azot na jakość międzypowierzchni dielektryk/półprzewodnik w strukturze MOS Ti/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki prac nad formowaniem tlenku termicznego na powierzchni węgla krzemu oraz wpływ wygrzewania w atmosferze zawierającej fosfor lub azot na jakość międzypowierzchni dielektryk/półprzewodnik w układzie SiO<sub>2</sub>/4H-SiC. Stwierdzono, że wygrzewanie dwuetapowe w atmosferze POCl<sub>3</sub> w temperaturze 1000 °C, oraz kolejno NO w temperaturze 1100 °C pozwala zredukować gęstość stanów pułapkowych do poziomu ok.  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  przy krawędzi pasma przewodnictwa.

**Abstract.** The aim of this studies was investigation of the influence of oxidation and annealing processes in the phosphorus or nitrogen containing atmosphere on the quality of the dielectric/semiconductor interface in the Ti/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC metal-oxide-semiconductor structure. It was found that two-stage annealing, in POCl<sub>3</sub>-containing atmosphere at the temperature of 1000 °C, and successively in NO-containing atmosphere at the temperature of 1100 °C allows to reduce the density of interface trap to the level of approx.  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  near the conduction band edge. **(The influence of oxidation and annealing processes in the phosphorus or nitrogen containing atmosphere on the quality of the dielectric/semiconductor interface in the Ti/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC metal-oxide-semiconductor structure)**

**Słowa kluczowe:** SiC, stany powierzchniowe, dielektryk bramkowy, międzypowierzchnia dielektryk/półprzewodnik, POCl<sub>3</sub>, NO  
**Keywords:** SiC, surface states, gate dielectric, semiconductor/dielectric interface, POCl<sub>3</sub>, NO

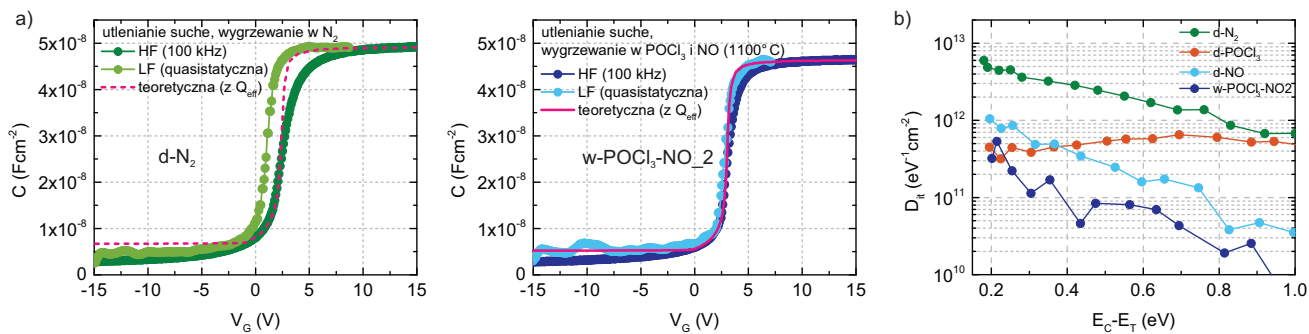
### Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych elementów technologii tranzystorów tranzystorów z bramką typu MOS w węglu krzemu jest utlenianie termiczne powierzchni w celu wytworzenia dielektryka bramkowego. Uzyskanie dobrej jakości międzypowierzchni dielektryk/półprzewodnik jest kluczowe ze względu na fakt, że rozpraszanie nośników związane z wysoką gęstością stanów powierzchniowych o energiach bliskich energii krawędzi pasma przewodnictwa lub pasma walencyjnego w zdecydowany sposób wpływa na zmniejszenie ruchliwość nośników w indukowanym kanale tranzystora z bramką typu MOS. Odpowiednia optymalizacja procesów wytwarzania dielektryka bramkowego dla przyrządów w węglu krzemu może prowadzić do wzrostu ruchliwości nośników w kanale nawet o dwa rzędy wielkości [1], [2], [3], co przekłada się bezpośrednio na niską rezystancję w stanie włączenia  $R_{DS, on}$  tranzystora. W przypadku przyrządów, z kanałem typu p, dla których w czasie włączenia nośnikami większościowymi są elektrony, kluczową rolę odgrywa koncentracja stanów pułapkowych o poziomach energetycznych bliskich pasma przewodnictwa. W niniejszej pracy skupiono się na zmniejszeniu gęstości stanów pułapkowych w tym obszarze. Za najbardziej skuteczną metodę redukcji gęstości stanów powierzchniowych w przyrządach z bramką typu MOS na podłożu z węgla krzemu uznaje się wprowadzenie w obszar przejściowy SiO<sub>2</sub>/SiC azotu [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] lub fosforu [13], [14], [15]. Proponowano także procesy implantacji fosforu w obszar przejściowy przed procesem utleniania [16]. W ostatnim czasie pojawiły się doniesienia o bardzo niskiej gęstości stanów uzyskanej na granicy z tlenkiem wytworzonym metodą utleniania plazmowego w atmosferze pod ciśnieniem 6kPa [17] oraz metodą osadzania warstw atomowych ALD [18]. W przeciwieństwie do technologii krzemowej, nie obserwuje się poprawy jakości międzypowierzchni tlenek-dielektryk po zastosowaniu wygrzewania w atmosferze wodoru [19]. Do redukcji stanów powierzchniowych na międzypowierzchni SiO<sub>2</sub>/SiC stosuje się wygrzewanie w atmosferze podtlenku azotu N<sub>2</sub>O [20], tlenku azotu NO [13][21][22] oraz trichloru fosforu POCl<sub>3</sub> [20], [13]. Wygrzewanie w N<sub>2</sub>O oraz w NO może powodować znaczący wzrost rezystywności SiC domieszkowanego na typ

p w obszarze pod dielektrykiem, ponieważ azot może wnikać w pozycje węzłowe stając się aktywnym elektrycznie, z kolei na tej samej zasadzie wygrzewanie w POCl<sub>3</sub> może powodować wzrost koncentracji nośników n-SiC [20], w związku z powyższym spodziewany spadek rezystancji w warstwie przypowierzchniowej jest większy, niż wynikałoby z samego zmniejszenia zjawiska rozpraszania na stanach powierzchniowych. Celem niniejszej pracy było zbadanie wpływu połączenia obu powszechnie stosowanych metod redukcji stanów pułapkowych na jakość międzypowierzchni dielektryk-półprzewodnik w układzie SiO<sub>2</sub>/4H-SiC.

### Szczegóły eksperymentu

Jako podłoża w eksperymencie wykorzystano niskooporowe płytki węgla krzemu 4H-SiC o koncentracji domieszki  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  z warstwą epitaksjalną typu n o koncentracji domieszki  $1.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  oraz grubości 10  $\mu\text{m}$ . Przed wytworzeniem struktur testowych podłoża zostały umyte w rozpuszczalnikach organicznych oraz w roztworze caro (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> w proporcji 3:1), następnie zostały poddane wysotemperaturowemu procesowi utleniania w atmosferze tlenu suchego (w temperaturze 1175 °C, w czasie 360 lub 180 min) lub mokrego (w temperaturze 1175 °C, w czasie 80 minut) tak, aby uformowany został tlenek SiO<sub>2</sub> o grubości z przedziału 50-70 nm. Wybrane próbki następnie zostały poddane wygrzewaniu (POA – Post Oxidation Annealing) w atmosferze zawierającej azot w postaci NO, N<sub>2</sub> i/lub w atmosferze zawierającej fosfor w postaci POCl<sub>3</sub>. Trichlorek fosforu do komory dostarczony był z bublera za pomocą azotu. Otrzymany gaz był dodatkowo rozcieńczony azotem oraz wzbogacony tlenem w celu minimalizacji wzrostu upływności [16]. Wygrzewanie w POCl<sub>3</sub> prowadzone było przez 10 min w temperaturze 1000 °C. Po wygrzewaniu w POCl<sub>3</sub> próbki zostały wygrzane w czystym N<sub>2</sub> w temperaturze 1000 °C przez 30 min lub w NO (0.5 slm NO + 2 slm N<sub>2</sub>) w temperaturze 1000, 1100 lub 1175 °C. Wybrane próbki bezpośrednio po utlenianiu zostały poddane wygrzewaniu w atmosferze NO w temperaturze 1000 °C. Zastosowano międzyetapową charakteryzację elipsometryczną w celu wyznaczenia przyrostów grubości i zmian właściwości optycznych tlenku po kolejnych wygrzewaniach. W kolejnym kroku, w procesie suchego trawienia (w plazmie CF<sub>4</sub>, P = 100 W, p = 50



Rys. 1. Przykładowe a) zmierzone i obliczone teoretyczne charakterystyki pojemnościowo-napięciowe kondensatorów MOS Ti/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC oraz b) gęstości stanów powierzchniowych w funkcji odległości energetycznej od krawędzi pasma przewodnictwa.

mT) usunięto tlenek ze spodniej strony płytek w celu odsłonięcia powierzchni przed naporowaniem metalizacji kontaktu omowego (Ti/Ni o grubościach 10/150 nm). Kontakt omowy do spodniej powierzchni próbki uformowano poprzez wygrzewanie osadzonej metalizacji w atmosferze Ar w temperaturze 1050°C, przez 3 minuty. Następnie za pomocą techniki lift-off zostały zdefiniowane struktury kondensatorowe na tlenku (z metalizacją Ti/Al o grubości 10/150 nm) w formie kolistej o średnicach 150, 200, 300 i 750 μm. Wytworzone struktury MOS zostały wygrzane w temperaturze 320°C przez czas 5 minut w atmosferze Ar. Otrzymane struktury MOS zostały poddane wszechstronnej charakteryzacji elektrycznej poprzez pomiar i analizę charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V) oraz quasistatycznych i wysokoczęstotliwościowych charakterystyk pojemnościowo-napięciowych (C-V) przy częstotliwości sygnału  $f = 100$  kHz i o amplitudzie 30 mV w kierunku od akumulacji do zubożenia. Pomiar w obu kierunkach struktur MOS niepoddanych dodatkowym wygrzewaniu wykazywał niewielką histerezę. Pomiar I-V i C-V wykonano przy pomocy zestawu źródeł mierzających (SMU) B1505, firmy Keysight. Do wyznaczenia gęstości stanów powierzchniowych oraz napięcia płaskich pasm metodą hi-low, jako niskoczęstotliwościową charakterystykę wykorzystano charakterystykę quasistatyczną. Wyznaczono również ładunek efektywny porównując otrzymane charakterystyki C-V z charakterystykami wyznaczonymi teoretycznie. Przykładowe charakterystyki C-V i wyznaczone na ich podstawie zależności gęstości stanów energetycznych w funkcji położenia względem krawędzi pasma przewodnictwa przedstawiono na Rys. 1. W celu wyeliminowania wpływu ładowania defektów zgromadzonych w tlenku w pobliżu interfejsu, które mogą wymieniać z półprzewodnikiem ładunek (tzw. NIT - *Near Interface Traps*) w trakcie pomiaru quasistatycznego, przed pomiarem zastosowano stres napięciowy, którego czas trwania ustalono na 60 s. Na wybranych próbkach została zmierzona także koncentracja jonów ruchomych metodą Bias-Temperature, zgodnie z metodą opisaną w publikacji [23]. Następnie po dziesięć struktur zostało scharakteryzowane przez pomiar charakterystyki prądowo napięciowej. Zakres napięć przyjęto od zera do napięcia, przy którym natężenie prądu osiągnęło wartość 10 mA. Na tej podstawie wyznaczono wartość pola krytycznego.

### Wyniki i dyskusja wyników

Wyniki analizy gęstości stanów powierzchniowych podano w Tabelicy 1 oraz na Rys. 2. Dla próbki wytworzonej w atmosferze suchego tlenu (1175°C, 6h) i studzonej w atmosferze azotu bez dodatkowych procesów technologicznych osiągnięto gęstość stanów powierzchniowych, liczonych ok. 0,2 eV od krawędzi pasma przewodnictwa (przy założeniu

koncentracji samoistnej nosników w 4H-SiC w temperaturze pokojowej  $n_i = 1 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$ ) na poziomie ok.  $4.8 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ . Jest to wartość porównywalna z wynikami prezentowanymi w literaturze [24], [25], [26]. Jako główne źródło powierzchniowych stanów pułpkowych zazwyczaj przyjmuje się defekty typu dimer węglowy w położeniu węglowym ( $C - C_i$ )<sub>C</sub> lub międzywęzłowym ( $C_i$ )<sub>2</sub> związane z nadmiarem atomów węgla w obszarze przejściowym SiO<sub>2</sub>/SiC wynikające z niedostatecznej prędkości usuwania atomów węgla z rejonu interfejsu w trakcie procesu utleniania [16], [27]. Wygrzanie próbki utlenionej w atmosferze suchego tlenu w atmosferze NO przez czas 30 min pozwoliło obniżyć gęstość stanów powierzchniowych przy krawędzi pasma do poziomu blisko  $8 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ . Najważniejszy mechanizm usunięcia defektu ( $C - C_i$ )<sub>C</sub> poprzez wygrzewanie w azocie polega na przyłączeniu azotu do defektu, w wyniku czego skojarzony z nim pułpkowy poziom energetyczny przesuwany jest w obręb energii pasma lub na usunięciu międzywęzłowego węgla, poprzez podstawienie go azotem [28]. Defekt ( $C_i$ )<sub>2</sub> jest podatny na działanie azotu na podobnej zasadzie [29]. Alternatywnym sposobem na poprawę właściwości tlenku jest wprowadzenie w obszar przejściowy SiO<sub>2</sub>/SiC atomów fosforu. Korzystny wpływ fosforowania obszaru przejściowego prawdopodobnie związany jest ze zwiększeniem odległości międzyatomowych w strukturze SiO<sub>2</sub>, co skutkuje przyspieszeniem dyfuzji atomów węgla ku powierzchni, a w efekcie zmniejszeniem liczby defektów grup węglowych. Za hipotezą tą przemawia fakt, że obecność fosforu znacząco przyspiesza proces utleniania. Wprowadzenie atomów fosforu może nastąpić w drodze implantacji lub poprzez dyfuzję przez szkliwo z fazy lotnej POCl<sub>3</sub> [16][30]. Wygrzanie tlenku wytworzonego metodą suchego utleniania w atmosferze zawierającej fosfor pozwoliło wytworzyć układ o powierzchniowej gęstości stanów na poziomie  $6 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ . Lepszy wynik, niż w przypadku wygrzewania w NO może być spowodowany dodatkowym mechanizmem podanym przez Pensla i Okuno - wprowadzenie do tlenku fosforu ma powodować relaksację naprężeń w SiO<sub>2</sub> przy granicy z SiC, co przekłada się na obniżenie gęstości stanów powierzchniowych [31], [32]. Podobne zjawisko występuje na interfejsie SiO<sub>2</sub>/Si [13]. W dalszej części eksperymentu wykonano próbki poddane wygrzewaniu dwuetapowemu. Kolejno najpierw w atmosferze POCl<sub>3</sub>, potem w NO, przy czym zastosowano trzy temperatury wygrzewania w NO (1000°C dla próbki *w\_POCl<sub>3</sub>\_NO\_1*, 1100°C dla próbki *w\_POCl<sub>3</sub>\_NO\_2* i 1170°C dla próbki *w\_POCl<sub>3</sub>\_NO\_3*), bowiem wg badań Fujihiry wpływ wygrzewania w NO na poprawę jakości interfejsu silnie zależy od temperatury procesu [33]. Na próbce *w\_POCl<sub>3</sub>\_NO\_1* udało się uzyskać gęstość stanów na poziomie  $5 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ , na próbce *w\_POCl<sub>3</sub>\_NO\_2* gęstość stanów

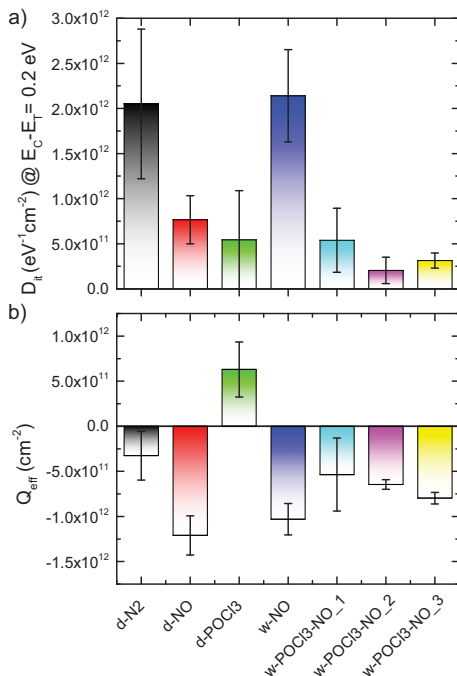
Tablica 1. Podstawowe parametry elektryczne badanych struktur MOS Ti/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC wyznaczone na podstawie pomiarów charakterystyk C-V i I-V.

Nazwa	utlenianie*	T <sub>POCl<sub>3</sub></sub> (°C)	T <sub>N<sub>2</sub></sub> (°C)	T <sub>NO</sub> (°C)	t <sub>ox</sub> elips. (nm)	t <sub>ox</sub> C-V (nm)	D <sub>it</sub> (eV <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> )**	V <sub>FB</sub> (V)	Q <sub>eff</sub> (cm <sup>-2</sup> )	E <sub>BR</sub> (MV/cm)
d_N <sub>2</sub>	d, 360 min.	-	1000	-	75	80	4.8×10 <sup>12</sup>	2.37	-3.2×10 <sup>11</sup>	8.84
d_NO	d, 180 min.	-	-	1000	52	50	7.6×10 <sup>11</sup>	3.97	-1.2×10 <sup>12</sup>	9.6
d_POCl <sub>3</sub>	d, 360 min.	1000	1000	-	85	78	5.4×10 <sup>11</sup>	-1.15	6.3×10 <sup>11</sup>	12.3
w_NO	w, 80 min.	-	-	1000	53	53	2×10 <sup>12</sup>	3.52	-1×10 <sup>12</sup>	7
w_POCl <sub>3</sub> _NO_1	w, 80 min.	1000	1000	1000	66	58	5.4×10 <sup>11</sup>	2.47	-5.4×10 <sup>11</sup>	10.3
w_POCl <sub>3</sub> _NO_2	w, 80 min.	1000	1000	1100	74	73	2×10 <sup>11</sup>	3.32	-6.5×10 <sup>11</sup>	10.1
w_POCl <sub>3</sub> _NO_3	w, 80 min.	1000	1000	1170	74	73	3.1×10 <sup>11</sup>	3.82	-7.9×10 <sup>11</sup>	8.9

\* d - suche, w - mokre

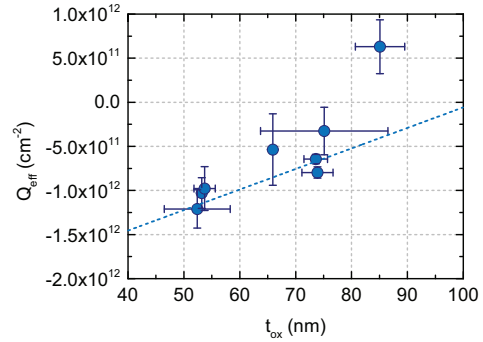
\*\* dla energii pułapek w odległości od krawędzi pasma przewodnictwa E<sub>c</sub>-E<sub>T</sub>=0.2 eV

wyniosła 2×10<sup>11</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>, ale dla jeszcze wyższej temperatury wygrzewania w NO gęstość wzrosła do poziomu nieco ponad 3×10<sup>11</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>. Poprawa jakości interfejsu po dwuetapowym wygrzewaniu prawdopodobnie jest związana ze zwiększeniem średniej odległości między atomami po wprowadzeniu fosforu, co skutkuje większą efektywnością działania azotu przy usuwaniu defektów (C - C<sub>i</sub>)<sub>C</sub> i (C<sub>i</sub>)<sub>2</sub> ze względu na zwiększoną możliwość dyfuzji węgla ku powierzchni SiO<sub>2</sub>. Wraz ze wzrostem temperatury NO nasilają się dwa zjawiska. Z jednej strony NO coraz bardziej utlenia cienki obszar na granicy międzypowierzchni, skuteczniej usuwając defekty węglowe, z drugiej strony tlenek się coraz bardziej densyfikuje, co prawdopodobnie prowadzi do ponownego spadku stałych dyfuzyjnych i w efekcie do wzrostu D<sub>it</sub> spowodowanego ograniczeniem możliwości penetracji międzypowierzchni przez tlen i azot [34]. Potwierdzają to wyniki pomiaru elipsometrycznego, przedstawione na końcu sekcji. Osiągnięty dla optymalnych parametrów wynik 2×10<sup>11</sup> eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup> znajduje się w grupie najlepszych wyników literaturowych [13], [30]. Wyniki wyznaczonych gęstości stanów o energiach bliskich pasma przewodnictwa przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Zależność gęstości stanów powierzchniowych oraz powierzchniowego ładunku efektywnego od procedury utleniania i wygrzewania POA.

W większości przypadków obserwowano równomierne obniżenie gęstości stanów powierzchniowych o poziomach energetycznych odległych od pasma przewodnictwa 0,2 – 1,0 eV. Badanie stanów pułapkowych o energii bardziej odległej była praktycznie niemożliwa ze względu na czułość

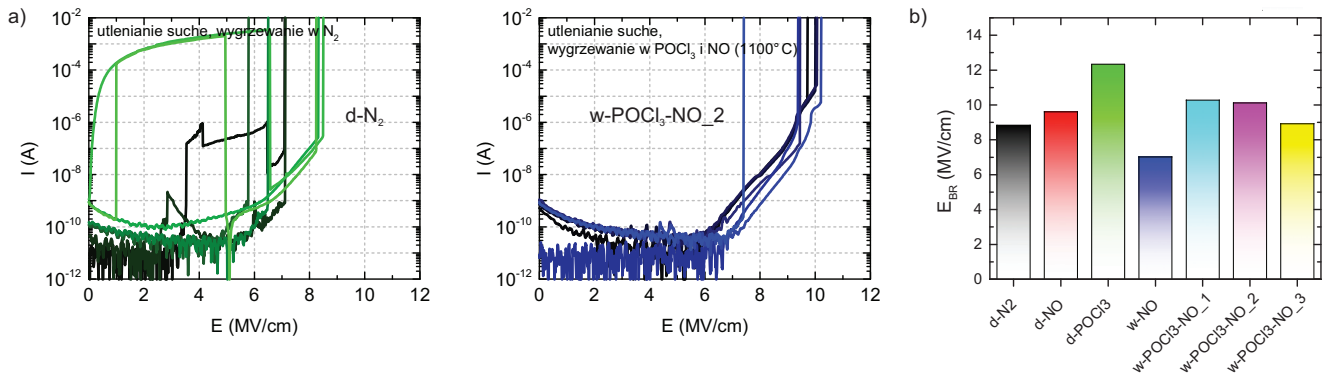


Rys. 3. Zależność ładunku efektywnego w tlenku od procedury utleniania i wygrzewania POA.

zastosowanej metody, ponadto praca skupiała się wokół minimalizacji stanów mających największy wpływ na ruchliwość nośników w kanale w tranzystorze MOS z kanałem typu p, zatem stanów o energiach bliskich pasma przewodnictwa. Rzeczywista energia stanów może się różnić od wyznaczonej ze względu na niemożność precyzyjnego określenia koncentracji samoistnej w SiC. Do wyliczeń przyjęto wyznaczoną teoretycznie gęstość dla temperatury pokojowej 1×10<sup>-8</sup> cm<sup>-3</sup>. Wykresy gęstości stanów w funkcji odległości energetycznej od dna pasma przewodnictwa przedstawiono na Rys. 1 wraz z przykładowymi charakterystykami pojemnościowo-napięciowymi, służącymi do wyznaczenia parametrów międzypowierzchni.

Pomiary elipsometryczne pozwoliły kontrolować grubość warstwy po poszczególnych procesach utleniania i wygrzewania. Stwierdzono, że w trakcie procesu fosforyzacji grubość tlenku zwiększa się o ok. 20-25 nm w zależności od grubości wygrzewanego tlenku. Z kolei wygrzewanie w atmosferze NO prawdopodobnie densyfikuje tlenek, ponieważ maleje jego grubość mierzona elipsometrycznie, jednocześnie przyrasta współczynnik załamania [35]. Zjawisko to ilościowo zależy od temperatury wygrzewania w NO, co przedstawia Tablica 2. Warto również zwrócić uwagę, że rozrzuty grubości tlenków wytwarzanych w procesie utleniania suchego były większe, niż rozrzuty grubości tlenków wytwarzanych na mokro (6-14% względem 1-4%). Potwierdza to obserwacje autorów z poprzednich badań [16].

Próbka wygrzana w POCl<sub>3</sub> ma ujemne napięcie płaskich pasm, które znacznie (średnio o ok. 3 V) różni się od napięcia płaskich pasm z pozostałych próbek. Może to wynikać z braku procesu wygrzewania w NO, jak i z różnicy grubości pomiędzy próbkami. Autor skłania się do drugiej hipotezy, ponieważ po uwzględnieniu niepewności pomiarowej wyznaczony ładunek efektywny układa się w zależności monotonicznej względem grubości tlenku, co zobrazowano na Rys. 3. Ponieważ wartości ładunku efektywnego układają się w liniową zależność od grubości tlenku należy przypuszczać, że w objętości tlenku jest równomiernie rozłożony ładunek o znaku dodatnim, z kolei na międzypowierzchni znajduje



Rys. 4. Przykładowe a) zmierzone charakterystyki prądowo-napięciowe kondensatorów MOS Ti/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC o średnicy 200 μm oraz b) maksymalne wartości krytycznego natężenia pola elektrycznego.

Tablica 2. Zmiana grubości i wartości współczynnika załamania pod wpływem wygrzewania w atmosferze NO w różnej temperaturze

T <sub>NO</sub> (°C)	przed wygrzewaniem w NO		po wygrzewaniu w NO		różnica grubości Δd (nm)
	d (nm)	n (λ=650 nm)	d (nm)	n (λ=650 nm)	
1000	75	-	66.4	1.472	-8.6
1100	75	-	62.1	1.487	-12.7
1170	86	-	72.6	1.488	-13.4

się ładunek ujemny. Źródłem ładunku na międzypowierzchni SiO<sub>2</sub>/SiC mogą być naładowane stany powierzchniowe, jak i pułapki typu NIT, np. N<sub>i</sub>, NO<sub>i</sub> [29]. W celu określenia jaka część ładunku w objętości jest ładunkiem ruchomym, mogącym mieć wpływ na stabilność napięcia progowego potencjalnego przyrządu, a jaka jest ładunkiem stałym, przeprowadzono pomiar Bias-Temperature na próbce *d-POCl<sub>3</sub>*. Natężenie pola elektrycznego w tlenku bramkowym ustalono na ok. 1 MV/cm, przy napięciu dodatnim podanym na bramkę. Temperatura wygrzewania w trakcie badania wynosiła 200°C, Czas wygrzewania 10 min. Efektywna powierzchniowa gęstość jonów ruchomych wyznaczono na poziomie  $(7 \pm 1.5) \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . Jeżeli przyjąć, że pułapek NIT jest pomijalnie mało, co jest uzasadnione, ponieważ pętla histerezy przy pomiarze C-V od akumulacji do inwersji i od inwersji do akumulacji była praktycznie nieobserwowalna, ekstrapolując wykres z Rys. 3 do wartości ładunku dla tlenku o zerowej grubości otrzymamy ładunek zgromadzony na powierzchni interfejsu (ok.  $-3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ). Wynika stąd, że ładunek ruchomy stanowi ok. 17% ładunku w objętości tlenku.

Na podstawie napięcia przebicia i grubości otrzymanych z pomiarów pojemnościowo napięciowych wyznaczono wartość pola krytycznego, przy którym następuje przebicie niszczące tlenku. Jako kryterium przebicia przyjęto przepływ prądu o wartości 10 mA. Obliczone wartości pola krytycznego dla poszczególnych próbek, oraz przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe przedstawiono na Rys. 4. Pole krytyczne dla tlenków wygrzewanych w atmosferze tlenu suchego, a następnie poddanych wygrzewaniu w N<sub>2</sub> lub NO wyniosło niespełna 10 MV/cm. Tlenek utleniany na mokro charakteryzował się o ok. 30% niższym napięciem przebicia, co jest zgodne z wcześniejszymi obserwacjami autorów [36]. Z kolei pole krytyczne dla tlenków wygrzewanych w atmosferze zawierającej fosfor wyniosło powyżej 10 MV/cm, za wyjątkiem próbki wygrzewanej dodatkowo w atmosferze NO w temperaturze 1175°C, dla której wartość ta spadła do ok. 9 MV/cm. Na charakterystykach prądowo napięciowych dla wartości pola elektrycznego powyżej 5-6 MV/cm można zaobserwować wzrost prądu upływu związany z tunelowaniem Fowlera-Nordheima [37] przez

trójkątną barierę potencjału. Uzyskana wartość pola krytycznego dla próbki *d-POCl<sub>3</sub>* wynosi ok. 12,3 MV/cm, przekracza zazwyczaj obserwowane wartości pola krytycznego w warstwach SiO<sub>2</sub> o grubościach 50-100 nm i prawdopodobnie jest związane z obniżeniem natężenia pola w objętości półprzewodnika w związku z obecnością ładunku przestrzennego powstałego w trakcie dyfuzji fosforu.

### Podsumowanie

W niniejszej pracy przeprowadzono systematyczne badania wpływu wygrzewania w atmosferze zawierającej fosfor lub azot tlenków wytworzonych podczas utleniania termicznego powierzchni węgla krzemu na jakość międzypowierzchni SiO<sub>2</sub>/4H-SiC. Stwierdzono, że wygrzewanie dwuetapowe w atmosferze POCl<sub>3</sub> w temperaturze 1000°C, oraz kolejno NO w temperaturze 1100°C pozwala zredukować gęstość stanów pułapkowych do poziomu ok.  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  przy krawędzi pasma przewodnictwa. Zastosowanie tej metody w trakcie procesów wytwarzania tranzystorów z bramką typu MOS np. MOSFET lub IGBT, powinno pozwolić na uzyskanie dobrych parametrów elektrycznych przyrządu. Zastosowanie wyższej temperatury drugiego etapu wygrzewania - w atmosferze NO - nie daje już tak dobrych rezultatów, podobnie jak stosowanie wygrzewania jednoetapowego w atmosferze POCl<sub>3</sub> albo NO. Tlenki wytworzone w dwuetapowym procesie wygrzewania charakteryzują się też wysoką odpornością na przebicie - wyznaczone pole krytyczne wynosi nieco ponad 10 MV/cm, co powinno mieć dodatkowy wpływ na wysoką niezawodność wytwarzanych przyrządów.

*Praca była finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, nr umowy TECHMAT-STRATEG1/347452/1/NCBR/2017, projekt pt. Badania materiałowe w celu opracowania tranzystora IGBT z węgla krzemu oraz urządzenia do ładowania samochodu elektrycznego.*

**Autorzy:** mgr inż. Maciej Kamiński, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Al. Lotników 32/46 02-668 Warszawa oraz Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektron-

iki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: [maciej.kaminski@imif.lukasiewicz.gov.pl](mailto:maciej.kaminski@imif.lukasiewicz.gov.pl),  
 dr inż. Ernest Brzozowski, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Al. Lotników 32/46 02-668 Warszawa, e-mail: [ernest.brzozowski@imif.lukasiewicz.gov.pl](mailto:ernest.brzozowski@imif.lukasiewicz.gov.pl),  
 dr inż. Andrzej Taube, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Al. Lotników 32/46 02-668 Warszawa, e-mail: [andrzej.taube@imif.lukasiewicz.gov.pl](mailto:andrzej.taube@imif.lukasiewicz.gov.pl),  
 mgr inż. Oskar Sadowski, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Al. Lotników 32/46 02-668 Warszawa, e-mail: [oskar.sadowski@imif.lukasiewicz.gov.pl](mailto:oskar.sadowski@imif.lukasiewicz.gov.pl),  
 dr inż. Krystian Król, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, e-mail: [k.krol@imio.pw.edu.pl](mailto:k.krol@imio.pw.edu.pl),  
 dr hab. inż. Marek Guziewicz, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Al. Lotników 32/46 02-668 Warszawa, e-mail: [marek.guziewicz@imif.lukasiewicz.gov.pl](mailto:marek.guziewicz@imif.lukasiewicz.gov.pl)

#### LITERATURA

- [1] Hiyoshi, T., Masuda, T., Wada, K., Harada, S., Namikawa, Y.: Improvement of Interface State and Channel Mobility Using 4H-SiC (0-33-8) Face Materials Science Forum, 740-742, pp. 506–509, 2013.
- [2] Liu, G., Ahyi, A. C., Xu, Y., Isaacs-Smith, T., Sharma, Y. K., Williams, J. R. i inni: Enhanced Inversion Mobility on 4H-SiC (11 $\bar{2}$ 0) Using Phosphorus and Nitrogen Interface Passivation, IEEE Electron Device Letters, 34(2), pp. 181–183, 2013.
- [3] Chung, G. Y., Tin, C. C., Williams, J. R., McDonald, K., Di Ventura, M., Pantelides, S. T. i inni: Effect of nitric oxide annealing on the interface trap densities near the band edges in the 4H polytype of silicon carbide, Appl. Phys. Lett., 76(13), pp. 1713–1715, 2000.
- [4] Li, H., Dimitrijević, S., Harrison, H. B., Sweatman, D.: Interfacial characteristics of N<sub>2</sub>O and NO nitrided SiO<sub>2</sub> grown on SiC by rapid thermal processing, Applied Physics Letters, 70(15), pp. 2028–2030, 1997.
- [5] Jamet, P., Dimitrijević, S., Tanner, P.: Effects of nitridation in gate oxides grown on 4H-SiC, Journal of Applied Physics, 90(10), pp. 5058–5063, 2001.
- [6] Lai, P. T., Chakraborty, S., Chan, C. L., Cheng, Y. C.: Effects of nitridation and annealing on interface properties of thermally oxidized SiO<sub>2</sub>/SiC metal-oxide-semiconductor system, Applied Physics Letters, 76(25), pp. 3744–3746, 2000.
- [7] Afanasev, V. V., Stesmans, A., Ciobanu, F., Pensl, G., Cheong, K. Y., Dimitrijević, S.: Mechanisms responsible for improvement of 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> interface properties by nitridation, Appl. Phys. Lett., 82(4), pp. 568–570, 2003.
- [8] Gudjónsson, G., Ólafsson, H. Ö., Sveinbjörnsson, E. Ö.: Enhancement of Inversion Channel Mobility in 4H-SiC MOSFETs using a Gate Oxide Grown in Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O), Materials Science Forum, 457-460, pp. 1425–1428, 2004.
- [9] Yoshioka, H., Nakamura, T., Kimoto, T.: Generation of very fast states by nitridation of the SiO<sub>2</sub>/SiC interface, Journal of Applied Physics, 112(2), 024520, 2012.
- [10] Rozen, J., Dhar, S., Zvanut, M. E., Williams, J. R., Feldman, L. C.: Density of interface states, electron traps, and hole traps as a function of the nitrogen density in SiO<sub>2</sub> on SiC, Journal of Applied Physics, 105(12), 124506, 2009.
- [11] Chew, K., Tin, C., Ahyi, C., Chong, K., Liang, M., Chong, S. i inni: A Study on the Electronic Properties of Nitric Oxide Annealed MOS Structures Processed on 4H-SiC, MRS Proceedings, 1305, MRS10-1305-aa17-35, 2011.
- [12] Peng, Z. Y., Wang, Y. Y., Shen, H. J., Bai, Y., Tang, Y. D., Chen, X. M. i inni: Re-Investigation of SiC/SiO<sub>2</sub> Interface Passivation by Nitrogen Annealing, Materials Science Forum, 897, pp. 335–339, 2017.
- [13] Okamoto, D., Yano, H., Hirata, K., Hatayama, T., Fuyuki, T.: Improved Inversion Channel Mobility in 4H-SiC MOSFETs on Si Face Utilizing Phosphorus-Doped Gate Oxide, IEEE Electron Device Letters, 31(7), pp. 710–712, 2010.
- [14] Yano, H., Hatayama, T., Fuyuki, T.: POCl<sub>3</sub> Annealing as a New Method for Improving 4H-SiC MOS Device Performance, ECS Transactions, 50(3), pp. 257–265, 2012.
- [15] Stedile, F. C., Radtke, C., Soares, G. V., Pitthan, E., Palmieri, R., Corrêa, S. A.: SiO<sub>2</sub>/SiC Interfacial Region: Presence of Silicon Oxycarbides and Effects of Hydrogen Peroxide and Water Vapor Thermal Treatments, Materials Science Forum, 717-720, pp. 747–752, 2012.
- [16] Król, K., Sochacki, M., Turek, M., Żuk, J., Borowicz, P., Teklińska, D. i inni: Influence of Phosphorus Implantation on Electrical Properties of Al/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC MOS Structure, Materials Science Forum, 821-823, pp. 496–499, 2015.
- [17] Liu, X.-Y., Hao, J.-L., You, N.-N., Bai, Y., Tang, Y.-D., Yang, C.-Y., Wang, S.-K.: High-Mobility SiC MOSFET With Low Dit Using High Pressure Microwave Plasma Oxidation, Chinese Physics B., 29, 037301, 2020.
- [18] Jo, Y.-J., Moon, J.-H., Seok, O., Bahng, W., Park, T.-J., Ha M.-W.: Electrical Characteristics of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC Metal-oxide-semiconductor Capacitors with Low-temperature Atomic Layer Deposited SiO<sub>2</sub>, Journal of Semiconductor Technology and Science, 17(2), pp. 265–270, 2017.
- [19] Afanasev, V. V., Bassler, M., Pensl, G., Schulz, M.: Intrinsic SiC/SiO<sub>2</sub> Interface States, Physica Status Solidi (a), 162(1), pp. 321–337, 1997.
- [20] Swanson, L. K., Fiorenza, P., Giannazzo, F., Frazzetto, A., Roccaforte, F.: Correlating macroscopic and nanoscale electrical modifications of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC interfaces upon post-oxidation-annealing in N<sub>2</sub>O and POCl<sub>3</sub>, Applied Physics Letters, 101(19), 193501, 2012.
- [21] Peng, Z. Y., Wang, Y. Y., Shen, H. J., Bai, Y., Tang, Y. D., Wu, J. i inni: Investigation of the Interface Quality and Reliability of 4H-SiC MOS Structure with NO and Forming Gas Annealing Treatment, Materials Science Forum, 858, pp. 647–650, 2016.
- [22] Williams, J. R., Chung, G. Y., Tin, C. C., McDonald, K., Farmer, D., Chanana, R. K. i inni: Passivation of the 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> Interface with Nitric Oxide, Materials Science Forum, 389-393, pp. 967–972, 2002.
- [23] Piskorski, K., Przewłocki, H. M., Esteve, R., Bakowski, M.: Characterization of band diagrams of different metal-SiO<sub>2</sub>-SiC(3C) structures, Materials Science Forum, 711, pp. 99–103, 2012.
- [24] Okamoto, D., Sometani, M., Harada, S., Kosugi, R., Yonezawa, Y., Yano, H.: Improved Channel Mobility in 4H-SiC MOSFETs by Boron Passivation, IEEE Electron Device Letters, 35(12), pp. 1176–1178, 2014.
- [25] Król, K., Sochacki, M., Szmied, J.: Investigation on the mechanisms of nitrogen shallow implantation influence on trap properties of SiO<sub>2</sub>/n-type 4H-SiC interface, Acta Physica Polonica A, 125, pp. 1033–1037, 2014.
- [26] Kodigala, S. R., Chattopadhyay, S., Overton, C., Ardoin, I., Gordon, B. J., Johnstone, D. i inni: Growth and surface analysis of SiO<sub>2</sub> on 4H-SiC for MOS devices, Applied Surface Science, 330, pp. 465–475, 2015.
- [27] Palmieri, R., Radtke, C., Silva, M. R., Boudinov, H., da Silva, E. F.: Trapping of majority carriers in SiO<sub>2</sub>/4H-SiC structures., Journal of Physics D: Applied Physics, 42(12), 125301, 2009.
- [28] S. Salemi, N. Goldsman, A. Akturk, A. Lelis, in: Proc. Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Process and Devices SISPAD 2012, Denver (USA), IEEE, Piscataway 2012, p. 121.
- [29] Deák, P., Knaup, J. M., Hornos, T., Thill, C., Gali, A., Frauenheim, T.: The mechanism of defect creation and passivation at the SiC/SiO<sub>2</sub> interface, Journal of Physics D: Applied Physics, 40(20), pp. 6242–6253, 2007.
- [30] Fiorenza, P., Giannazzo, F., Roccaforte, F.: Characterization of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC Interfaces in 4H-SiC MOSFETs: A Review, Energies, 12(12), 2310, 2019.
- [31] Pensl, G., Bassler, M., Ciobanu, V. V., Afanas'ev, H. Yano, T. Kimoto, and H. Matsunami, Silicon Carbide-Materials, Processing and Devices, edited by A. Agarwal, M. Skowronski, Cooper, J.A. Jr., and E. Janzén, MRS Symposia Proceedings No. 640 Materials Research Society, Pittsburgh, 2001, p. H3.2.1.
- [32] Okuno, E., Endo, T., Sakakibara, T., Onda, S., Itoh, M., Uda, T.: Ab Initio Calculations of SiO<sub>2</sub>/SiC Interfaces and High Channel Mobility MOSFET with (11-20) Face, Materials Science Forum, 615-617, pp. 793–796, 2009.
- [33] Fujihira, K., Tarui, Y., Imaizumi, M., Ohtsuka, K., Takami, T., Shiramizu, T. i inni: Characteristics of 4H-SiC MOS interface annealed in N<sub>2</sub>O, Solid-State Electronics, 49(6), pp. 896–901, 2005.
- [34] Pantelides, S. i inni: Si/SiO<sub>2</sub> and SiC/SiO<sub>2</sub> Interfaces for MOS-

FETs – Challenges and Advances, Materials Science Forum, 527-529, pp. 935–948, 2006.

- [35] Maj, G.: On the Relationship Between Refractive Index and Density for SiO<sub>2</sub> Polymorphs, Phys Chem Minerals, 10, pp. 133–136, 1984.
- [36] Król, K., Kalisz, M., Sochacki, M., Szmids, J.: The Influence of Post-Oxidation Annealing Process in O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O on the Quality of Al/SiO<sub>2</sub>/n-Type 4H-SiC MOS Interface, Materials Science Forum, 740-742, pp. 753–756, 2013.
- [37] Taube, A., Guzewicz, M., Kosiel, K., Gołaszewska-Malec, K., Król, K., Kruszka, R. i inni: Characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/4H-SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC MOS structures, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 64(3), pp. 547–551, 2016.
- [38] Król, K., Konarski, P., Misnik, M., Sochacki, M., Szmids, J.: The Effect of Phosphorus Incorporation into SiO<sub>2</sub>/4H-SiC (0001) Interface on Electrophysical Properties of MOS Structure, Acta Physica Polonica A, 126, pp. 1100–1103, 2014.