

Wpływ reaktywnego trawienia jonowego wspomaganego plazmą BCl_3 na jakość powierzchni węgliku krzemu 4H-SiC

Streszczenie. Jakość powierzchni materiałów po wykonaniu procesów technologicznych jest ważnym zagadnieniem niezbędnym do zoptymalizowania przy próbie wykonania dobrej jakości przyrządów półprzewodnikowych. W zależności od parametrów procesu, jakość powierzchni się zmienia. W niniejszej pracy zaprezentowano wpływ parametrów suchego trawienia RIE (ang. reactive ion etching) wspomaganego plazmą BCl_3 na jakość powierzchni węgliku krzemu 4H-SiC. Podczas prac modyfikowano moc dostarczaną do reaktora, ciśnienie w reaktorze stosunek gazów roboczych oraz czas trawienia procesu. Powierzchnia materiału po trawieniu została zobrazowana za pomocą wysokorozdzielczego skaningowego mikroskopu elektronowego SEM (ang. scanning electron microscope). Chropowatość została zmierzona za pomocą mikroskopu sił atomowych AFM (ang. atomic force microscope).

Abstract. The quality of material surface after technological process is one of the most important issue, during semiconductors device manufacturing. The quality of the surface is changing depending on parameters of process that was realized. This paper presents influence of the RIE (reactive ion etching) parameters using BCl_3 plasma on the 4H-SiC surface quality. After the process, the SiC surface using high resolution SEM (scanning electron microscope) was investigated. The roughness of the surface was measured using AFM (atomic force microscopy). (Investigation of reactive ion etching using BCl_3 plasma on the 4H-SiC surface quality).

Słowa kluczowe: suche trawienie, 4H-SiC, jakość powierzchni, techniki plazmowe.

Keywords: silicon carbide, 4H-SiC, plasma etching, surface quality

Wstęp

Ocena jakości powierzchni materiałów trawionych za pomocą metod suchego usuwania warstw wspomaganego plazmą jest jednym z ważniejszych tematów z punktu widzenia poprawności działania przyrządów wytwarzanych przy użyciu tej techniki. Podłoża krzemowe, na których opiera się większość produkcji układów półprzewodnikowych, zostały już dokładnie zbadane pod tym kątem [1]. Rozwój przyrządów mocy spowodował konieczność użycia innych materiałów. W tego rodzaju aplikacjach sięga się po materiały szerokopasmowe [2-3]. Problematyka suchego trawienia takich materiałów nie jest szeroko opisana w literaturze. Najlepsze rezultaty osiągane są poprzez zastosowanie reaktorów ICP (ang. inductively coupled plasma) [4], które zapewniają wysoką szybkość trawienia warstw. Niestety, dostęp do tego typu urządzeń jest bardzo ograniczony. Jednakże, w wielu przypadkach proces RIE może okazać się wystarczający [5], co więcej, może pozostawić powierzchnię materiału całkowicie wolną od wad spowodowanych plazmą.

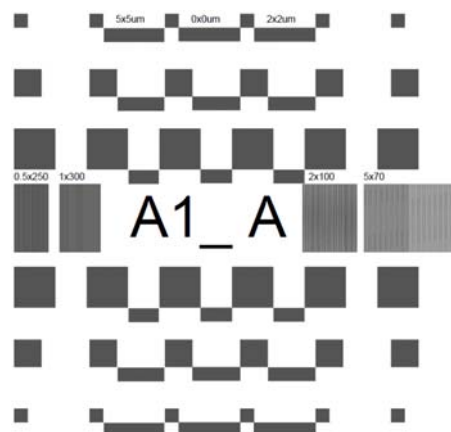
Węgiel krzemu (SiC) jest jednym z materiałów używanych do konstrukcji przyrządów elektroniki dużej mocy, pracujących w wysokiej temperaturze, a także wysokiej częstotliwości. Dzieje się tak z powodu szerokiego pasma energii zabronionych, dużej prędkości nasycenia nośników oraz wysokiego napięcia przebicia [6-7]. Ze względu na swoją odporność chemiczną, optymalizacja suchego procesu trawienia węgliku krzemu jest niezwykle trudna pod względem jakości powierzchni. Powoduje to konieczność scharakteryzowania każdego procesu trawienia pod kątem danego zastosowania w przyrządzie półprzewodnikowym.

Mokre trawienie węgliku krzemu jest nieskuteczne ze względu na wysoką odporność chemiczną tego materiału. Praktycznie nie jest możliwe uzyskanie anizotropowego trawienia SiC [8]. Alternatywną dla metody mokrego trawienia jest RIE z użyciem trójchlorku boru (BCl_3). Pełna kontrola tego procesu jest możliwa dzięki precyzyjnemu monitorowaniu parametrów wejściowych. Jest to obiecująca technika, która może zostać użyta także w zastosowaniach komercyjnych.

Ważnym zadaniem z punktu widzenia poprawności działania przyrządów jest zarówno optymalizacja samego trawienia, jak i powtarzalność samego procesu. Opisywane eksperymenty przedstawiają wpływ reaktywnego trawienia jonowego wspomaganego plazmą BCl_3 na jakość powierzchni węgliku krzemu. Głównym celem badań było zmniejszenie chropowatości oraz zwiększenie gładkości powierzchni przy najwyższej możliwej szybkości trawienia.

Opis eksperymentu

Do opisywanych eksperymentów użyto podłoża wykonane z węgliku krzemu 4H-SiC o wymiarach $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Na powierzchni próbki rozwirowano pozytywny rezyst PMMA 950 A firmy MicroChem. Do przeniesienia wcześniej zaprojektowanego wzoru do warstwy maskującej zastosowano metodę naświetlania wiązką elektronową. Na Rys. 1 przedstawiono wzór, który został użyty podczas serii eksperymentów trawienia. Na jednym podłożu wzór ten był powielony czterokrotnie.



Rys.1. Projekt wzorów maski na potrzeby trawienia.

Kolejnym etapem badań było przeprowadzenie procesu suchego trawienia wspomaganego plazmą BCl_3 . Do tego celu użyto stanowiska firmy OXFORD. PlasmaLAB 80+ system. Podczas procesu oprócz gazu roboczego BCl_3

dodano także argon (Ar). Parametry wejściowe tego procesu, których wpływ został przebadany, to moc dostarczana do reaktora, ciśnienie w komorze, przepływ gazów roboczych oraz czas trwania procesu. W celu ograniczenia ilości eksperymentów zastosowano metodę ortogonalnych tablic Taguchi'ego [9]. W tabeli 1 przedstawiono zakresy wartości parametrów wejściowych wykorzystanych podczas trawienia SiC. Całkowity przepływ gazów roboczych został ustalony na poziomie 50 sccm. Podczas eksperymentów modyfikowano stosunek przepływu Ar do sumy przepływu gazów Ar+ BCl₃ w zakresie od 0,2 do 0,6.

Tabela 1. Zakresy wartości parametrów wejściowych podczas suchego trawienia węgla krzemu.

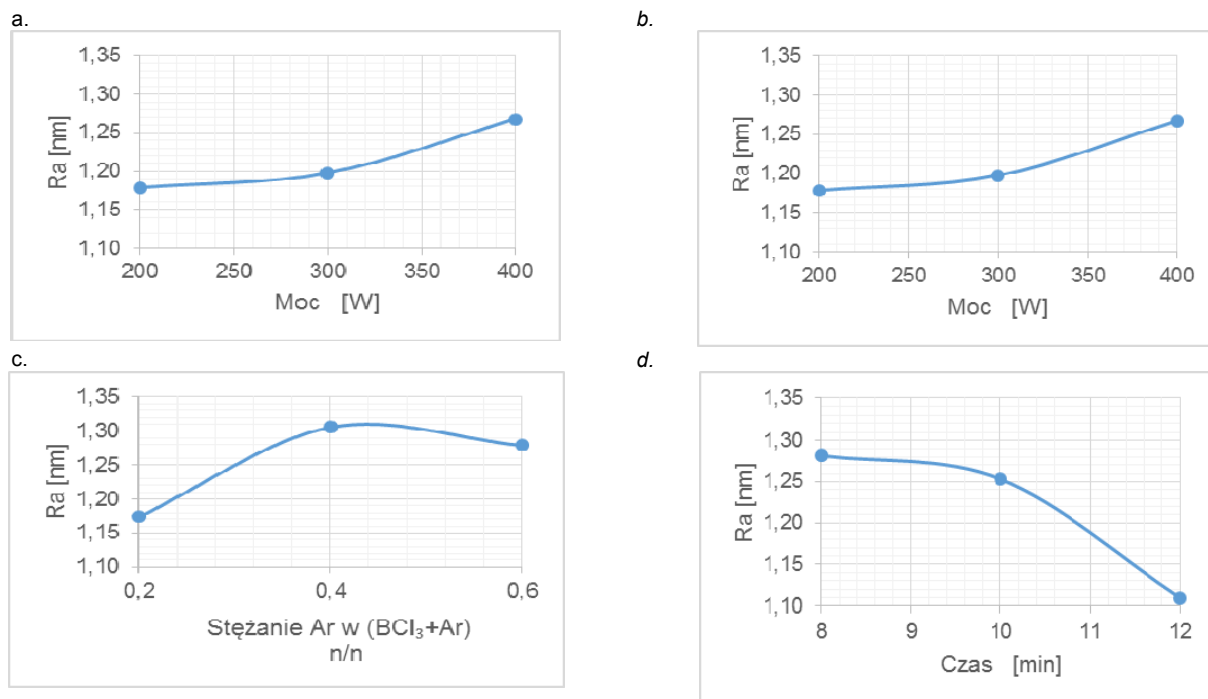
Parametry	Zakres
Moc [W]	200-400
Ciśnienie [mTorr]	40-60
Całkowity przepływ gazów roboczych [sccm]	50
Czas [min]	8-12

Po wykonaniu procesów trawienia, pozostała warstwa rezystu została usunięta przy użyciu acetonu. Za pomocą mikroskopu AFM został wyznaczony współczynnik chropowatości Ra. Następnie zostały wykonane zdjęcia podłoża wysokorozdzielczym mikroskopem SEM. Pozwoliły one zobrazować powierzchnie po trawieniu.

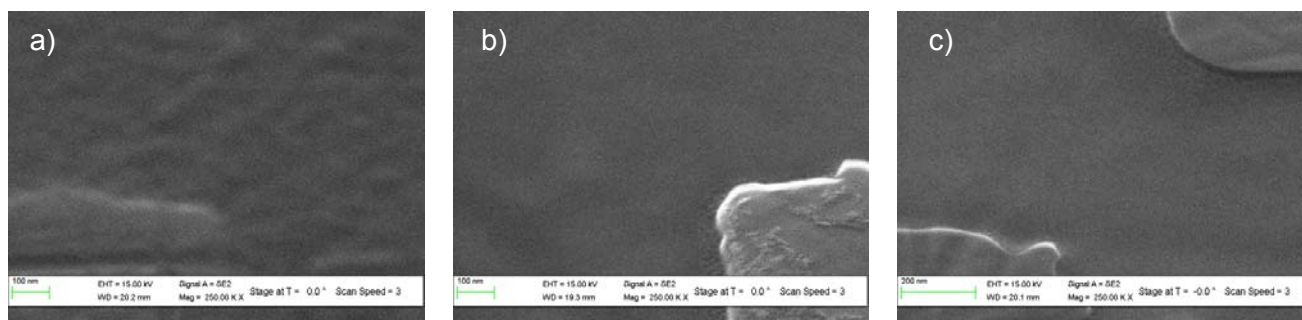
Wyniki

Podczas prac związanych z analizą wpływu reaktywnego trawienia jonowego na jakość powierzchni wybrano maksymalne możliwe zakresy parametrów wejściowych tego procesu, jakie umożliwiało stanowisko PlasmaLAB 80+. Pozwoliło to na obserwację wpływu poszczególnych parametrów na jakość podłoża. Na podstawie pomiarów chropowatości (Ra) oraz dzięki zastosowaniu ortogonalnych tablic Taguchi'ego zostały wyznaczone wpływy poszczególnych parametrów wejściowych procesu na współczynnik Ra. Na rys. 2 przedstawiono wpływ poszczególnych parametrów na chropowatość powierzchni po trawieniu.

Wraz ze zwiększaniem mocy dostarczanej do reaktora rośnie chropowatość powierzchni poddanej procesowi trawienia. Zmiana ciśnienia nieznacznie wpływa na jej jakość. Wraz z obniżaniem ciśnienia poprawia się jakość powierzchni. Analizując wykres zamieszczony na rys. 2c można zauważyć, że dodanie argonu do mieszaniny gazów roboczych wpływa pozytywnie na jakość powierzchni. Najlepszy wynik został otrzymany przy przepływie gazów roboczych na poziomie 30 sccm Ar oraz 20 sccm BCl₃. Ostatnim analizowanym parametrem był czas trwania procesu - wydłużanie go pozwala na osiągnięcie niższej wartości chropowatości powierzchni.

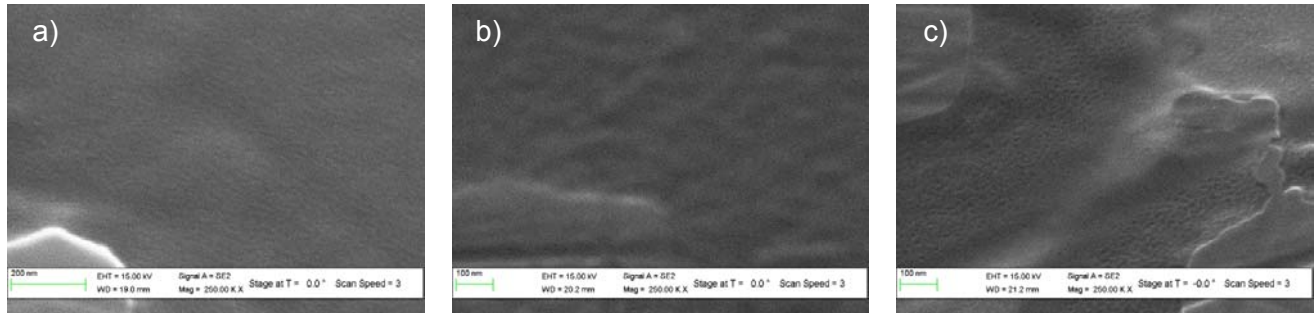


Rys. 2. Wpływ na parametry procesu: a) mocy dostarczanej do reaktora b) ciśnienia w komorze procesowej, c) stężenia Ar w mieszaninie gazów roboczych Ar i BCl₃, d) czasu trwania procesu na wartość parametru Ra.



Rys. 3. Powierzchnia węgla krzemu po procesach trawienia w plazmie chlorowej BCl₃ dla różnych przepływów roboczych a) 10 sccm Ar, 40 sccm BCl₃, b) 20 sccm Ar, 30 sccm BCl₃, c) 30 sccm Ar, 20 sccm BCl₃, przy mocy dostarczanej do reaktora na poziomie 300 W.

Po analizie danych zebranych mikroskopem AFM wykonano obrazowanie powierzchni za pomocą wysokorozdzielczego mikroskopu SEM. Na rys. 3 przedstawiono zdjęcie powierzchni podłoża SiC po procesie trawienia, gdzie głównym parametrem była zmiana stężenia gazów roboczych. Na rys. 3b oraz 3 c) można zauważyć obszary zamaskowane które nie zostały strawione. Dzięki temu można stwierdzić, że nietrawione wyspy nie mają wpływu na jakość powierzchni w bliskiej ich odległości.



Rys. 4. Powierzchnia węgla krzemu po procesach trawienia w plazmie chlorowej BCl_3 w zależności od mocy dostarczonej do plazmy a) 200 W, b) 300 W, c) 400 W, przy mieszaniu gazów roboczych na poziomie 10 sccm Ar 40sccm BCl_3 .

Powierzchnia podłoża po procesie, gdzie moc była najwyższa – 200 W (Rys. 4a), wygląda wizualnie najlepiej w porównaniu do reszty przedstawionych przykładów. Widać, że głębokość nierówności jest najmniejsza. Co więcej, cała powierzchnia rozpatrywanego fragmentu jest równomiernie pofalowana.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwalają na określenie wpływu reaktywnego trawienia jonowego wspomaganego plazmą BCl_3 na jakość powierzchni węgla krzemu. Wyniki badań pokazują, że dobór odpowiednich parametrów pozwala na redukcję chropowatości powierzchni. Wraz ze zwiększeniem mocy dostarczonej do reaktora zwiększa się chropowatość powierzchni. Skład mieszaniny gazów ma kluczowy wpływ na jakość powierzchni po procesie. Dobra jakość podłoża jest wysoce pożądana w aplikacjach, gdzie ma ono krytyczne znaczenie. Ponadto, na podstawie wyników możliwe jest zaprojektowanie procesu, którego rezultatem będzie powierzchnia o dużej wartości Ra. Może to być pomocne w utrzymaniu dobrego kontaktu elektrycznego do powierzchni węgla krzemu.

Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu TECHMATSTRATEG1/346922/4/NCBR/2017 pt. "Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużej mocy i wysokich częstotliwości".

Autorzy: mgr inż. Bartłomiej Stonio Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, b.stonio@imio.pw.edu.pl
mgr inż. Norbert Kwietniewski, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, N.Kwietniewski@elka.pw.edu.pl
dr inż. Piotr Firek, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, P.Firek@elka.pw.edu.pl
mgr inż. Mateusz Słowikowski, Politechnika Warszawska, Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii, ul. Poleczki 19, 02-822 Warszawa, m.slowikowski@cezamat.eu
mgr inż. Krystian Pavlov, Politechnika Warszawska, Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii, ul. Poleczki 19, 02-822 Warszawa, k.pavlov@cezamat.eu

Na rys. 3a zostało zamieszczone zdjęcie podłoża po procesie, w którym zawartość argonu była najmniejsza i wynosiła 10 sccm. Można zauważyć, że podłoże jest pofalowane, widać niedoskonałości. W przypadku, gdzie zawartość argonu była większa (20 oraz 30 sccm) jakoś podłoża jest znacznie lepsza. Na podstawie zdjęć SEM nie można jednoznacznie określić, który z procesów daje lepsze rezultaty.

dr inż. Piotr Caban, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, Piotr.Caban@itme.edu.pl
dr hab. inż. Mariusz Sochacki, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, M.Sochacki@elka.pw.edu.pl
prof. dr hab. inż. Jan Szmidt, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, j.szmidt@imio.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] S. Wolf and R. N. Tauber, *Silicon Processing for the VLSI Era. Vol. 1. Process Technology*. California: Sunset Beach, 1987.
- [2] G. Alfieri and T. Kimoto, "Structural stability and electronic properties of SiC nanocones: First-principles calculations and symmetry considerations," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 12, p. 123102, Mar. 2011.
- [3] P. R. Chalker, "Wide bandgap semiconductor materials for high temperature electronics," *Thin Solid Films*, vol. 343–344, pp. 616–622, Apr. 1999.
- [4] J. Hong, R. J. Shul, L. Zhang, L. F. Lester, H. Cho, Y. B. Hahn, D.C Hays, K. B. Jung, S. J. Pearton, C. M. Zetterling and M. Östling, "Plasma chemistries for high density plasma etching of SiC," *J. Electron. Mater.*, vol. 28, no. 3, pp. 196–201, Mar. 1999.
- [5] A. Szczesny, P. Śniecickowski, J. Szmidt, and A. Werbowy, "Reactive ion etching of novel materials - GaN and SiC," *User Model. User-adapt. Interact.*, vol. 70, no. 2–3, pp. 249–254, 2003.
- [6] H. Matsunami, "Technological Breakthroughs in Growth Control of Silicon Carbide for High Power Electronic Devices," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 10, pp. 6835–6847, Oct. 2004.
- [7] Y. Zhang, T. Guo, X. Tang, J. Yang, Y. He, and Y. Zhang, "Thermal stability study of n-type and p-type ohmic contacts simultaneously formed on 4H-SiC," 2018.
- [8] D. Zhuang and J. H. Edgar, "Wet etching of GaN, AlN, and SiC: A review," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 48, no. 1, pp. 1–46, 2005.
- [9] M. Firdaus, A. Muttalib, R. Y. Chen, S. J. Pearce, and M. D. B. Charlton, "Optimization of reactive-ion etching (RIE) parameters for fabrication of tantalum pentoxide (Ta_2O_5) waveguide using Taguchi method." *EPJ Web Conf. vol. 162*, International Conference on Applied Photonics and Electronics 2017 (InCAPE2017), p. 5, 2017.