

## Wpływ materiału maskującego na jakość odwzorowania w procesie suchego trawienia węgliku krzemu 4H-SiC w plazmie chlorowej

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano analizę wytrzymałości trzech rezystów na oddziaływanie plazmy chlorowej. Przeprowadzono serie procesów trawienia SiC, w których maskę zrealizowano przy użyciu materiałów PMMA 950, ZEP 520 oraz HSQ. W ramach opracowanych eksperymentów zbadano różne dawki naświetlania rezystów. Na potrzeby analizy wykonane zostały badania przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej. Ponadto wykorzystano profilometrię w celu określenia parametrów wyjściowych trawienia – szybkości trawienia rezystu i węgliku krzemu. Pomiary zrealizowano przed i po usunięciu maski z rezystu. Wyznaczono zakresy głębokości trawienia przy założonej grubości użytego materiału maskującego.

**Abstract.** The paper presents an analysis of the durability of three resists on the effect of chlorine plasma. A series of SiC etching processes were carried out, where using PMMA 950, ZEP 520 and HSQ materials the mask was made. As part of the experiments developed, various doses of irradiation were tested. For etching characterization scanning electron microscopy were performed. In addition, to determine the parameters like the etching speed of the resist and silicon carbide, profilometry was used. Measurements before and after removing the mask were realized. Possible etching depth ranges were determined at the assumed thickness of the masking material used. (Influence of masking materials on the quality of mapping in silicon carbide 4H-SiC dry etching processes in chlorine plasma).

**Słowa kluczowe:** węglik krzemu, 4H-SiC, trawienie plazmowe, Cl<sub>2</sub>, ICP.

**Keywords:** silicon carbide, 4H-SiC, plasma etching, Cl<sub>2</sub>, ICP

### Wstęp

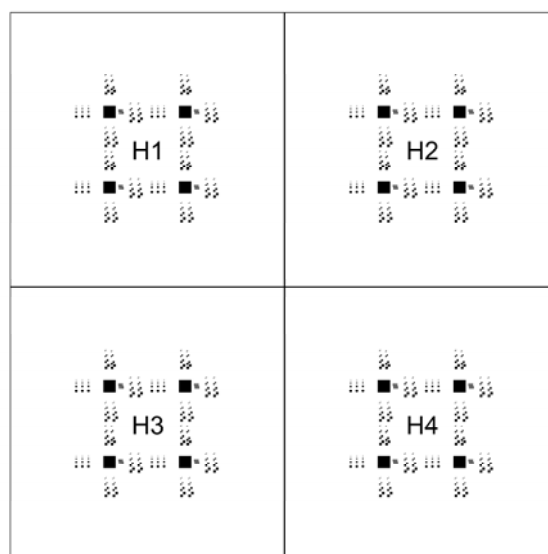
Procesy odwzorowania kształtów od lat stanowią jeden z najważniejszych nurtów rozwoju mikroelektroniki, nie tylko krzemowej, ale również tej, opartej na innych półprzewodnikach [1]. Konieczność wytwarzania coraz to nowszych generacji układów scalonych, zwiększania ich możliwości poprzez poprawę prędkości działania, integracji funkcji, wymusza opracowywanie coraz to nowszych technik, zarówno w procesach litografii jak i trawienia. Rodzaj docelowej struktury i jej funkcja, narzucają parametry i przebieg procesu trawienia. Z jednej strony może to być trawienie bardzo głębokich wzorów, o różnym stosunku szerokości do głębokości a także trawienie w celu uzyskania odpowiedniego nachylenia ścian oraz jakości powierzchni po trawieniu. Wynika z tego, że każdy proces powinien być od początku zaprojektowany pod kątem konkretnej technologii. Co więcej, należy zwrócić uwagę na materiały, które są trawione, tak aby dobrać odpowiednie gazy robocze, rodzaj wzbudzenia plazmy, moc i inne parametry, czyli najogólniej mówiąc, zestaw parametrów wejściowych procesu. Ponadto dobór parametrów nie powinien być opracowywany w oderwaniu od procesu litografii, w którym definiujemy maskę, która spowodować ma uzyskanie przez nas założonych wyników (między innymi wzorów). Dlatego w projektowaniu technologii trawienia konieczne jest uwzględnienie materiału maskującego i jego właściwości takich jak grubość, odporność na trawienie (selektywność), oraz jakość uzyskanego wzoru.

W prezentowanej pracy zbadany został wpływ materiałów maskujących na dokładność odwzorowania kształtów podczas procesów plazmowego trawienia węgliku krzemu. Materiał ten jest jednym z wiodących, jeśli chodzi o zastosowanie w przyrządach pracujących w warunkach wysokiej temperatury oraz mocy [2-4]. Opisywany kierunek prac wynika z konieczności wykonania dokładnych wzorów struktur w procesach trawienia SiC, przy założeniu możliwości sterowania dynamiką procesu (a więc czasem, głębokością trawienia). Użycie w tym celu trawienia mokrego nie jest najlepszym rozwiązaniem [5]. Na dobór materiału maskującego znaczący wpływ ma środowisko

plazmy, a przede wszystkim, jeśli chodzi o odpowiadające jej parametry technologiczne – moc, skład, rodzaj wzbudzenia, czas oddziaływania [6-8]. Nie bez znaczenia jest taki dobór parametrów, który pozwoli nie tylko na zrealizowanie z sukcesem odpowiedniego procesu – uzyskania określonego wyniku – ale również na usunięcie materiału maski, co czasami nie jest proste do osiągnięcia.

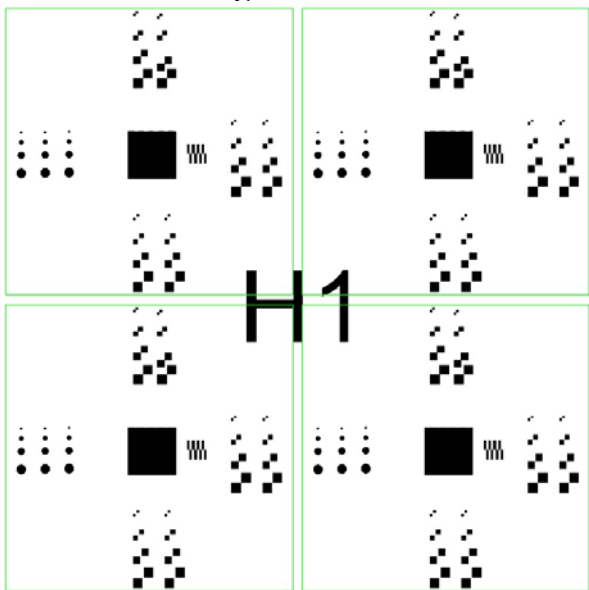
### Opis eksperymentu

Na potrzeby przeprowadzonych badań zrealizowano projekty wzorów (Rys. 1), jakie zostały przeniesione na podłoża 4H-SiC o wymiarach 12x12mm, w postaci naświetlonych warstw rezystu w procesie elektronolitografii. Jako rezysty zostały zastosowane PMMA 950, ZEP 520 oraz HSQ, naświetlane w urządzeniu do elektronolitografii posiadającym wiązkę gaussowską o wielkości plamki 5,72nm i prądzie wiązki 2nA.



Rys.1. Projekt wzorów masek do trawienia (na przykładzie rezystu HSQ).

Każda struktura przygotowana do procesu trawienia została podzielona na cztery części i naświetlona odpowiednio dawkami zebranymi w tabeli 1. Natomiast Rys. 2. przedstawia przykładową próbkę przygotowaną do procesu trawienia w której jako rezyst użyto HSQ. W centralnym miejscu każdej ćwiartki umieszczony jest kwadrat, w który został wypełniony strukturą periodyczną o okresie 360nm oraz wypełnieniu 50%.



Rys.2. Projekt wzorów masek do trawienia z zaznaczonymi na zielono obszarami o różnej dawce naświetlania (na przykładzie rezystu HSQ).

Tabela 1. Dawki naświetlania rezystów [ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ]

Rezyst	Obszar 1	Obszar 2	Obszar 3	Obszar 4
PMMA 950	475	487,5	512,5	500
ZEP 520	380	390	410	400
HSQ	950	957	1025	1000

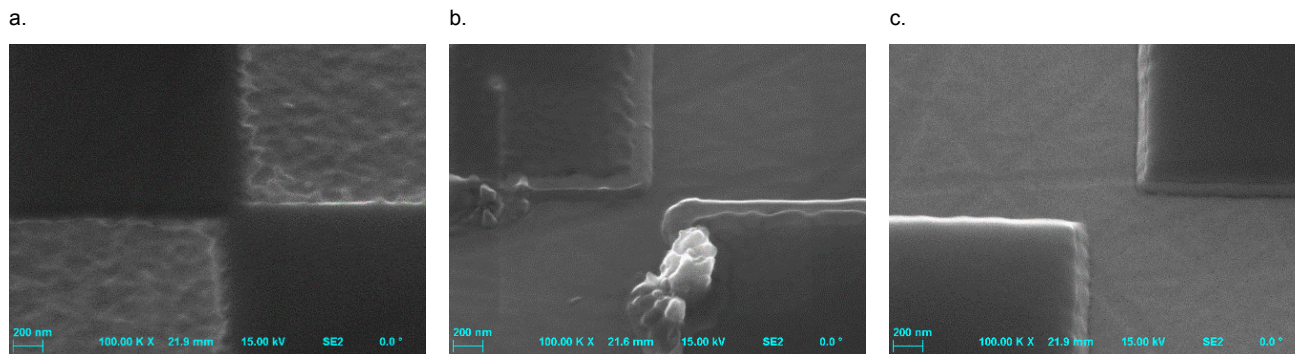
Po procesach przygotowawczych i kalibrujących wykonano cztery procesy trawienia, które pozwoliły na realizację 12 próbek (cztery procesy, w każdym trzy próbki z różnymi rezystami jako materiał maski). Wszystkie trawienia zostały przeprowadzone na stanowisku ICP Cobra firmy Oxford. Parametry procesów trawienia przedstawiono w tabeli 2. Proces 4 przeprowadzony był do momentu całkowitego usunięcia rezystu ZEP (moment zakończenia trawienia kontrolowano przy użyciu refraktometru). Powstałe, w wyniku trawienia, próbki oznaczone zostały jako pierwsza litera nazwy rezystu (P, Z, H) oraz numer procesu w którym została wytworzona (1, 2, 3, 4).

Tabela 1. Dawki naświetlania rezystów [ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ]

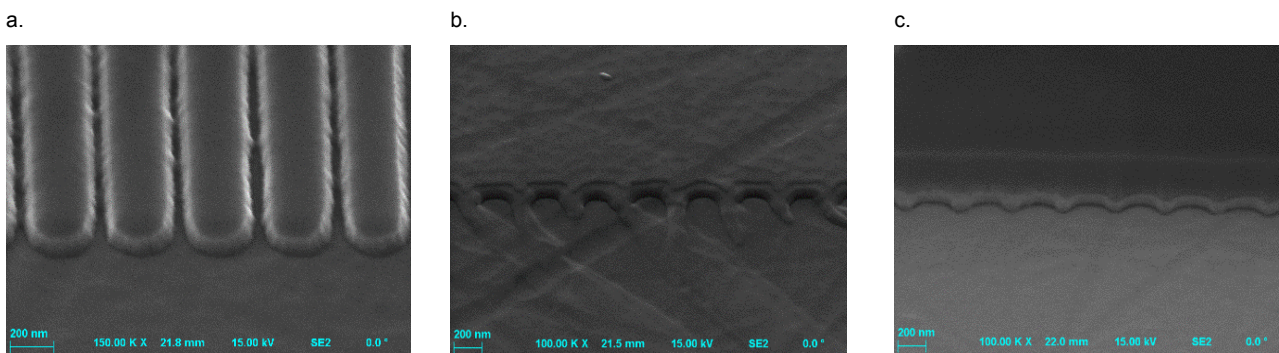
Parametr	Proces nr 1	Proces nr 2	Proces nr 3	Proces nr 4
Moc ICP [W]	1000	1000	1000	1000
Moc RIE [W]	70	100	130	100
Ciśnienie w komorze [mTorr]	8	8	8	8
Przepływ chloru [cm <sup>3</sup> /min]	40	40	40	40
Przepływ argonu [cm <sup>3</sup> /min]	10	10	10	10
Temperatura [°C]	50	50	50	50

### Wyniki

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki trawienia SiC po procesie trawienia nr 3 dla użytych rezystów. Widoczne jest zużycie maski na krawędziach wzoru. Oceniając optycznie jakość można uznać, że najlepsze rezultaty otrzymano dla ZEP, gdzie zarówno kształt zboczy jak i jakość brzegów trawienia są odwzorowane najlepiej.



Rys. 3. Zdjęcia SEM procesu trawienia 3. Zastosowane rezysty: a) HSQ; b) PMMA; c) ZEP



Rys. 4. Zdjęcia SEM wyników procesu 3 trawienia kształtów paskowych. Zastosowane rezysty: a) HSQ; b) PMMA; c) ZEP

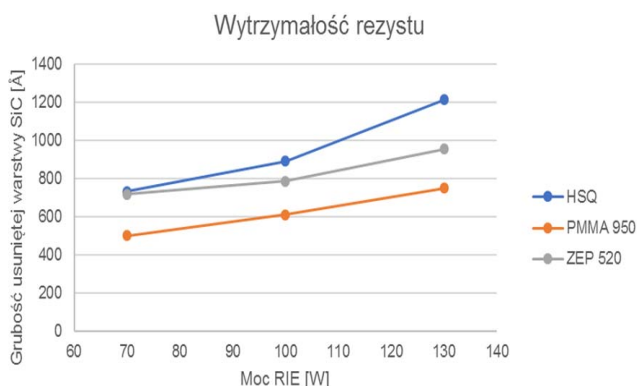
W przypadku wzorów periodycznych odwzorowanie udało się uzyskać tylko dla rezystu HSQ. Na rysunku 4 zaprezentowano przykładowe zdjęcia SEM po trawieniu wytworzonych wzorów.

W tabeli 3 zostały zebrane wyniki uzyskane w procesach trawienia, których parametry opisano w tabeli 2. Można stwierdzić, iż najbardziej odporny na proces usuwania jest rezyst HSQ, który charakteryzuje najniższe wartości szybkości trawienia (do 23,5 [Å/s]). Dzięki temu, jako odporny materiał umożliwia on realizowanie skutecznych procesów przy małej grubości masek. Zarówno PMMA jak i ZEP 520, w tym przypadku zachowywały się w sposób zbliżony i znacznie szybciej ulegały strawieniu.

Tabela 3. Wyniki trawienia węgla krzemu oraz materiału maski

Proces	Grubość rezystu [Å]	Strawiony rezyst [Å]	Szybkość trawienia rezystu [Å/s]	Strawiony SiC [Å]	Szybkość trawienia SiC [Å/s]
H1	1820,0	485,0	16,2	195,4	6,5
H2	1820,0	496,9	16,6	243,3	8,1
H3	1820,0	938,6	23,5	626,0	15,6
H4	1820,0	1461,9	11,2	1113,2	8,6
P1	5440	2025,7	67,5	186,4	6,2
P2	5440	2301,9	76,7	258,6	8,6
P3	5440	4339,8	108,5	598,4	15,0
P4	5440	5398,4	41,5	587,4	4,5
Z1	5600	1421,8	47,4	182,5	6,1
Z2	5600	1709,2	57,0	240,2	8,0
Z3	5600	3546,8	88,7	604,4	15,1
Z4	5600	5568,8	42,8	901,5	6,9

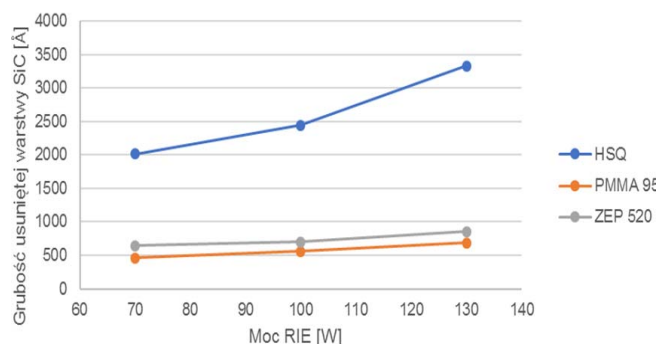
Na rysunkach 5 i 6 zobrazowano wytrzymałość rezystów jako zależność głębokości trawienia SiC w funkcji Mocy RIE. Na rysunku 5 widać, że zależności są zbliżone, jednak co ważne, rezysty nie są tej samej grubości i charakteryzują się różnymi szybkościami trawienia, które zostały pokazane w tabeli 3. Aby przedstawić wytrzymałość każdego z rezystów wykonane zostały znormalizowane charakterystyki (Rys. 6.). Przy założeniu grubości 500nm i uwzględnieniu szybkości trawienia rezystu wyraźnie widać, że największa odporność występuje w przypadku HSQ, gdzie możliwe są do realizacji procesy trawienia na ponad trzykrotnie większą głębokość.



Rys. 5. Grubość strawionej warstwy (dla różnej mocy RIE) przy użyciu rezystów HSQ, PMMA 950, ZEP 520 o grubości odpowiednio: 1820Å, 5440Å oraz 5600Å

Procesy trawienia SiC numer 1, 2 i 3 przebiegały podobnie. Grubość warstwy strawionego półprzewodnika, a co za tym idzie szybkość trawienia były w tych procesach zbliżone. Należy zwrócić uwagę, że znaczne różnice pojawiają się dla dłuższego procesu numer 4, w którym dłuższy czas trawienia spowodował usunięcie grubszej warstwy węgla krzemu, a co najważniejsze –tylko w przypadku rezystu HSQ udało się utrzymać szybkość trawienia na tym samym poziomie co w analogicznym procesie 2 (różnica dotyczyła tylko czasu trawienia). Proces 4 przebiega zdecydowanie wolniej, w przypadku gdy rezystami użytymi do maskowania były PMMA i ZEP.

Wytrzymałość rezystu przy jednakowych grubościach



Rys. 6. Wyliczona grubość strawionej warstwy (dla różnej mocy RIE) przy użyciu rezystów HSQ, PMMA 950, ZEP 520 o grubości znormalizowanej do 5000 Å

### Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że możliwe jest skuteczne realizowanie procesów trawienia SiC w oparciu o proces trawienia RIE ICP. Pomiary pokazały, że najbardziej obiecujące są parametry rezystu HSQ, w szczególności w odniesieniu do trawień głębokich. Istotny wpływ na uzyskiwane wzory ma dawka z jaką naświetlany jest rezyst a jej dobór w znaczący sposób wpływa na efekt końcowy realizowanego procesu technologicznego.

*Praca została sfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu TECHMATSTRATEG1/346922/4/NCBR/2017 pt. "Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużych 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](mailto:b.stonio@imio.pw.edu.pl),  
 mgr inż. Norbert Kwietniewski, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [N.Kwietniewski@elka.pw.edu.pl](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:k.pavlov@cezamat.eu),  
 dr hab. inż. Mariusz Sochacki, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, [M.Sochacki@elka.pw.edu.pl](mailto: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](mailto:j.szmidt@imio.pw.edu.pl).

## LITERATURA

- [1] S. Wolf, R.N. Tauber, "Silicon processing for the VLSI Era. Vol.1 – process technology", Lattice Press, Sunset Beach, California, (1987).
- [2] JB. Casady, RW. Johnson, „Status of Silicon Carbide (SiC) as a Wide-Bandgap Semiconductor for High-Temperature Applications: A Review“, Solid-State Electronics, 39 (10) (1996) 1409-22.
- [3] PR. Chalker, „Wide Bandgap Semiconductor Materials for High Temperature Electronics“, Thin Solid Films. 343-344 (1-2) (1999) 616-622.
- [4] T. Kimoto, „Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices“, The Japan Society of Applied Physics, 54 (4) (2015) 040103,
- [5] D. Zhuang, J.H. Edgar, „Wet etching of GaN, AlN, and SiC: a review“, Materials Science and Engineering: R: Reports, 48 (1) (2005) 1-46.
- [6] A. Szczęsny, P. Śniecikowski, J. Szmidt, A. Werbowy, "Reactive ion etching of novel materials - GaN and SiC", Vacuum 70 (2003) 249–254.
- [7] P.-S. Kang, K.-T. Kim, D.-P. Kim, Ch.-I. Kim, A.M. Efremov, "Dry etching characteristics of (Ba<sub>0.6</sub>,Sr<sub>0.4</sub>)TiO<sub>3</sub> thin films in high density CF<sub>4</sub>/Ar plasma", Surface and Coatings Technology 171 (1–3) (2003) 273–279.
- [8] A. Werbowy, P. Firek, J. Chojnowski, A. Olszyna, J. Szmidt, N. Kwietniewski, "Barium titanate thin films plasma etch rate as a function of the applied RF power and Ar/C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> mixture gas mixing ratio", physica status solidi (c) 4 (4) (2007) 1578–1580.