

## Termiczne formowanie tytanowych kontaktów omowych do węgla krzemu 4H-SiC

**Streszczenie.** W artykule omówiono wyniki eksperymentu wygrzewania tytanowych kontaktów omowych do węgla krzemu (4H-SiC) w temperaturach od 850 °C do 1100 °C. Porównano wyniki pomiarów elektrycznych kontaktów do płaszczyzny krzemowej (0001) i węglowej (000-1) węgla krzemu. Sprawdzono dwa warianty przygotowania powierzchni: mycie RCA oraz mycie i usuwanie warstwy materiału metodą termicznego utleniania i trawienia. Wykazano korzystny wpływ obecności wodoru podczas wygrzewania na liniowość charakterystyk oraz rezystancję kontaktów.

**Abstract.** In this work, the results of the experiment regarding the contact thermal formation of Ti/4H-SiC were discussed. The results of electrical contact measurements to the silicon (0001) and carbon (000-1) face of silicon carbide were compared. The influence of different preparation of the semiconductor surface, standard RCA cleaning and cleaning followed by sacrificial thermal oxidation were investigated. The beneficial impact of the presence of hydrogen during the annealing on the linearity of the characteristics and the resistance of contacts was demonstrated. (Thermal formation of titanium ohmic contacts for 4H-SiC silicon carbide).

**Słowa kluczowe:** Ti/SiC, kontakty omowe, termiczne formowanie kontaktów.

**Keywords:** Ti/SiC ohmic contacts, contacts thermal formation.

### Wprowadzenie

Węgiel krzemu jako materiał półprzewodnikowy jest powszechnie wykorzystywany w konstrukcji przyrządów wysokotemperaturowych i wysokich mocy [1]. Wytwarzanie wysokiej jakości kontaktów omowych do tego materiału jest procesem złożonym i często wymagającym dodatkowych, skomplikowanych operacji takich jak implantacja czy epitaksja wysokodomieszkowanych warstw, starannego przygotowania powierzchni oraz wysokotemperaturowego wygrzewania [2-3]. Procesy wytwarzania kontaktów omowych często projektowane są dla konkretnych specyficznych zastosowań i przyrządów. Najbardziej wymagające pod tym względem są oczywiście przyrządy mocy ze względu na straty generowane na kontaktach niezadawalającej jakości.

W pracy tej zbadano wpływ wysokotemperaturowego wygrzewania kontaktów Ti/SiC w dostępnym zakresie temperatur (do 1100 °C) na rezystancję kontaktów. Sprawdzono wpływ przygotowania powierzchni polegającego na wcześniejszym utlenieniu termicznym węgla krzemu oraz usunięciu tlenku bezpośrednio przed osadzeniem metalizacji kontaktowej. Przetestowano również wpływ wodoru w trakcie wygrzewania na właściwości kontaktów omowych. Porównano rezultaty uzyskiwane dla płaszczyzny krzemowej (0001) oraz węglowej (000-1) węgla krzemu. Celem przeprowadzonego eksperymentu było przede wszystkim określenie optymalnych parametrów procesu dla dostępnych urządzeń i wykonanie kontaktów Ti/4H-SiC o możliwie najmniejszej rezystancji.

### Szczegóły eksperymentu

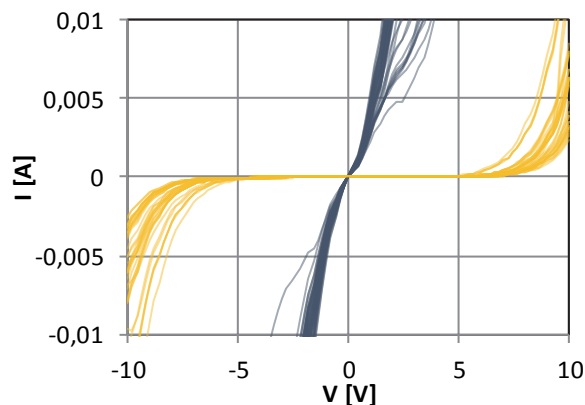
Komercyjnie dostępne podłoża węgla krzemu bez warstwy epitaksjalnej (SiCrystal) przygotowano standardową procedurą RCA. Część próbek poddano utlenianiu termicznemu i mokremu strawieniu tlenku w HF<sub>buf</sub>, w celu usunięcia materiału przypowierzchniowego. Na wszystkich próbkach wykonano wzór metodą „lift-off”. Warstwę tytanu o grubości 100 nm osadzono metodą rozpylania magnetronowego w urządzeniu Plasmalab System 400 firmy Oxford Instruments. Metalizację osadzano zarówno w płaszczyźnie krzemowej jak i węglowej. Testy wysokotemperaturowego formowania kontaktów prowadzono w piecu RTP w atmosferze argonu

lub argonu z wodorem (5%). Stosowano temperatury wygrzewania od 850 °C do 1100 °C i czas procesu 5 minut.

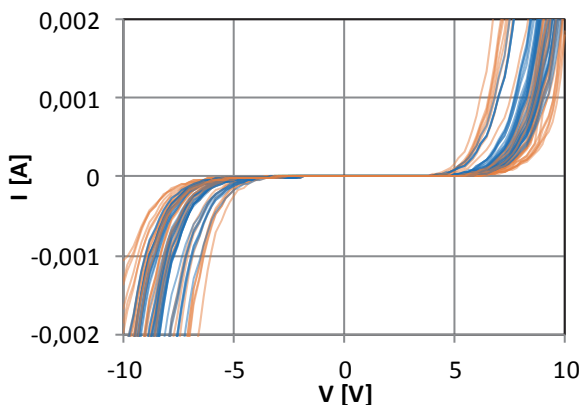
Wygrzane próbki scharakteryzowano elektrycznie korzystając z dwupunktowego pomiaru rezystancji na dwóch oddalonych od siebie o 50 μm prostokątnych kontaktach. Pomiary miały przede wszystkim charakter jakościowy i posłużyły do porównania między sobą wykonanych procesów. Bezwzględna wartość rezystywności kontaktów nie została wyznaczona, ale nie było to podstawowym celem eksperymentu.

### Wyniki

Charakterystyki prądowo-napięciowe (I-V) kontaktów zostały zmierzone przed procesami wygrzewania. Kontakty w płaszczyźnie węglowej charakteryzują się wyraźnie większą liniowością oraz większym nachyleniem charakterystyki przed termicznym formowaniem kontaktów (rys.1). Nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy próbkami charakteryzującymi się różnymi metodami przygotowania powierzchni przed osadzaniem metalizacji. Próbki poddane procesom mycia jak i próbki dodatkowo utlenione i wytrawione charakteryzują się podobnymi charakterystykami I-V. Na rysunku 2 zaprezentowano przebieg charakterystyk zmierzonych w płaszczyźnie krzemowej (0001) węgla krzemu.

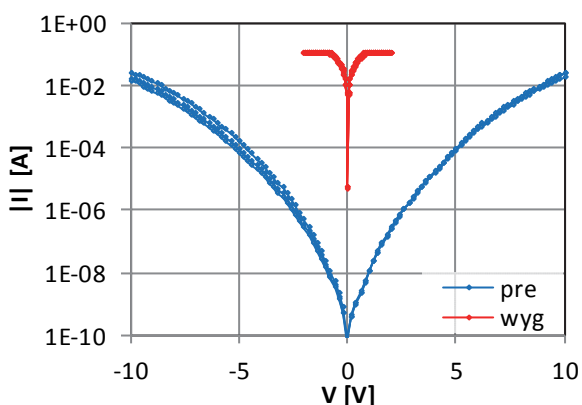


Rys.1. Charakterystyki I-V kontaktów Ti/4H-SiC przed wygrzewaniem – zestawienie dla płaszczyzny węglowej (czarny) i krzemowej (żółty) SiC

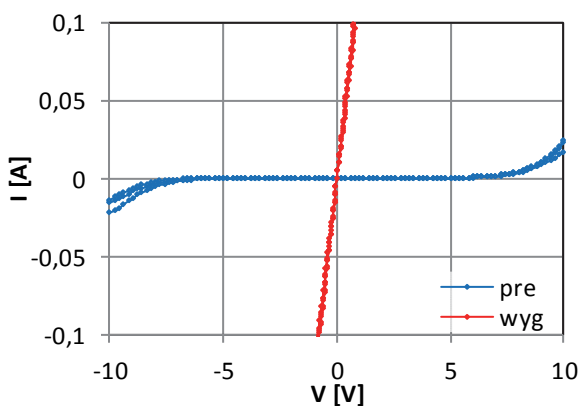


Rys.2. Charakterystyki I-V kontaktów Ti/4H-SiC przed wygrzewaniem – zestawienie dla różnych metod przygotowania powierzchni: utleniane (pomarańczowe), nieutleniane (niebieskie)

Zaobserwowano wyraźny wpływ wygrzewania na liniowość mierzonych charakterystyk prądowo-napięciowych oraz rezystancję kontaktów Ti/4H-SiC. Na rysunku 3 i 4 zestawiono charakterystyki zmierzone dla próbki z kontaktem w płaszczyźnie krzemowej (0001) węgla krzemowego przed i po wygrzewaniu w atmosferze Ar w temperaturze 1050 °C.

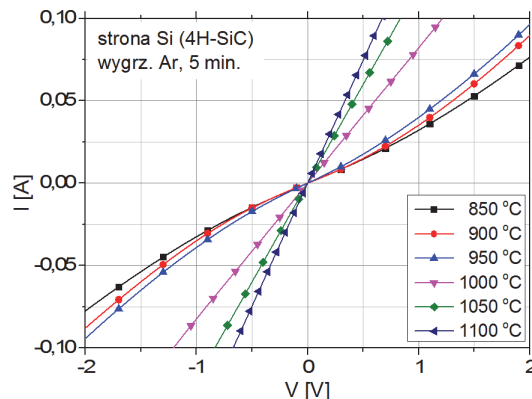


Rys.3. Charakterystyki I-V uzyskane przed wygrzewaniem (niebieski) i po wygrzewaniu (czerwony) kontaktów Ti wykonanych w płaszczyźnie krzemowej 4H-SiC i wygrzewanych w temperaturze 1050 °C w atmosferze Ar wykreślone w skali półlogarymicznej

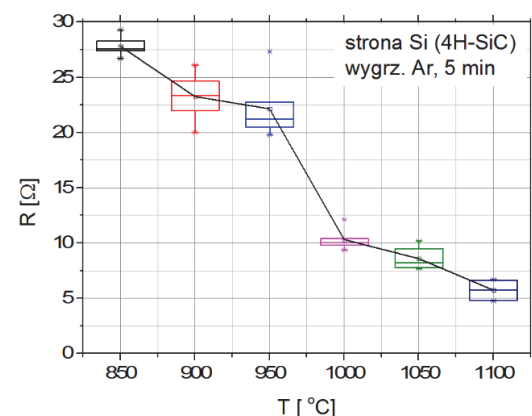


Rys.4. Charakterystyki I-V uzyskane przed wygrzewaniem (niebieski) i po wygrzewaniu (czerwony) kontaktów Ti wykonanych w płaszczyźnie krzemowej 4H-SiC i wygrzewanych w temperaturze 1050 °C w atmosferze Ar wykreślone w skali liniowej

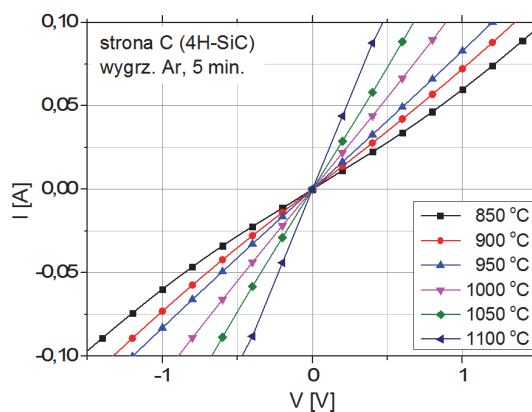
Dla wszystkich próbek przeprowadzone procesy wygrzewania poprawiły liniowość oraz zwiększyły nachylenie mierzonych charakterystyk I-V. Odpowiednie zestawienia charakterystyk zmierzonych po wygrzewaniu w funkcji temperatury wygrzewania dla płaszczyzn krzemowej i węglowej zaprezentowano na rysunkach 5 i 7. Na rysunkach 6 i 8 wykreślono wyznaczoną z nachylenia charakterystyk I-V rezystancję w funkcji temperatury wygrzewania.



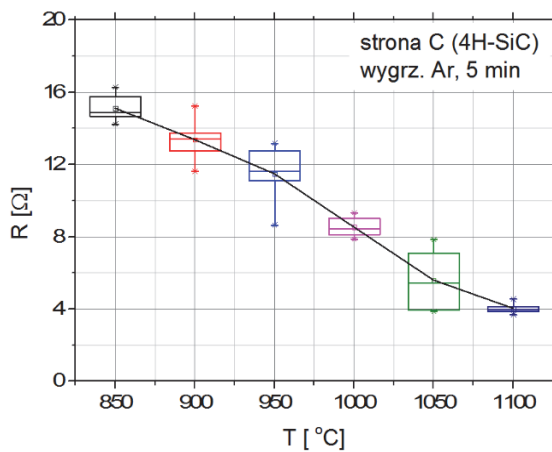
Rys.5. Charakterystyki I-V uzyskane po wygrzewaniu w różnych temperaturach kontaktów wykonanych w płaszczyźnie krzemowej (0001) 4H-SiC



Rys.6. Rezystancja wyznaczona z nachylenia charakterystyk I-V kontaktów wykonanych w płaszczyźnie krzemowej (0001) 4H-SiC zmierzonych po wygrzewaniu w różnych temperaturach



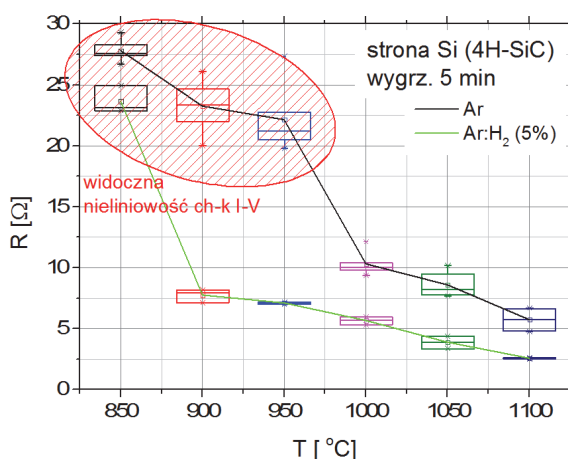
Rys.7. Charakterystyki I-V uzyskane po wygrzewaniu w różnych temperaturach kontaktów wykonanych w płaszczyźnie węglowej (000-1) 4H SiC



Rys.8. Rezystancja wyznaczona z nachylenia charakterystyk I-V kontaktów wykonanych w płaszczynie węglowej (000-1) 4H-SiC zmierzonych po wygrzewaniu w różnych temperaturach

Procesy wygrzewania w atmosferze argonu w pełnym zakresie użytecznych temperatur zapewniły zadowalającą liniowość kontaktów do płaszczyny węglowej węgla krzemu. Liniowość charakterystyk dla kontaktów w płaszczynie krzemowej uzyskana została dopiero w temperaturze 1000 °C. W obu przypadkach rezystancja wyznaczana z nachylenia charakterystyk malała wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania i była nieco niższa w przypadku kontaktów w płaszczynie węglowej.

Modyfikacja atmosfery wygrzewania poprzez dodanie wodoru (Ar – 95%, H<sub>2</sub> – 5%) wyraźnie poprawiła jakość kontaktów Ti/4H-SiC. Liniowość uzyskiwana była już w temperaturze 900 °C, czyli o 100 °C niższej niż miało to miejsce w przypadku atmosfery czystego argonu. Na rysunku 9 zestawiono rezystancje wyznaczone z nachylenia charakterystyk I-V zmierzonych dla kontaktów w płaszczynie krzemowej. W przypadku atmosfery wodorowej uzyskiwano wyraźnie mniejsze wartości rezystancji kontaktu.



Rys.9. Porównanie rezystancji wyznaczonej z nachylenia charakterystyk I-V kontaktów w płaszczynie krzemowej (0001) 4H-SiC wygrzewanych w atmosferze Ar i Ar:H<sub>2</sub>.

### Wnioski i podsumowanie

Przeprowadzono procesy formowania kontaktów omowych Ti/4H-SiC w zakresie temperatur 850 °C – 1100

°C i porównano charakterystyki I-V kontaktów w płaszczynie węglowej (000-1) i krzemowej (0001) węgla krzemu. Stwierdzono większą efektywność tworzenia kontaktów omowych w płaszczynie węglowej na podstawie uzyskiwanej liniowości charakterystyk w niższych temperaturach (już od 850 °C) oraz większym nachyleniu charakterystyk – mniejszej rezystancji. Liniowość charakterystyk I-V w przypadku kontaktów omowych w płaszczynie krzemowej uzyskiwana była dopiero przy wygrzewaniu w temperaturze od 1000 °C.

Zbadano wpływ dodatkowego utleniania powierzchni i usuwania tlenku przed osadzeniem metalizacji kontaktowej na rezystancję kontaktów. Nie stwierdzono wyraźnego wpływu tego procesu ani na liniowość charakterystyk I-V po wygrzewaniu ani na ich nachylenie. Pozwala to przypuszczać, że komercyjnie dostępny materiał podłożowy jest dobrej jakości i usuwanie przypowierzchniowej warstwy metodą utleniania i trawienia nie zmienia jego właściwości z punktu widzenia technologii wytwarzania kontaktów omowych.

Korzystny wpływ na formowanie tytanowych kontaktów do węgla krzemu ma wzbogacenie atmosfery wygrzewania wodorem. Obecność wodoru w procesach wygrzewania pozwala uzyskać liniowość kontaktów przy niższych temperaturach w porównaniu do procesów wygrzewania w czystym argonie. Uzyskiwane rezystancje kontaktów są w tym przypadku wyraźnie mniejsze.

*Praca finansowana była w ramach projektu „Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużych mocy i wysokich częstotliwości”, TECHMATSTRATEG1/346922/4/NCBR/2017*

**Autorzy:** 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), mgr inż. Jakub Szarafiński, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [Jakub.Szarafinski@gmail.com](mailto:Jakub.Szarafinski@gmail.com), dr hab. inż. Mariusz Sochacki, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [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, E-mail: [J.Szmidt@elka.pw.edu.pl](mailto:J.Szmidt@elka.pw.edu.pl), dr inż. Wawrzyniec Kaszub, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [Wawrzyniec.Kaszub@itme.edu.pl](mailto:Wawrzyniec.Kaszub@itme.edu.pl), dr inż. Tymoteusz Ciuk, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, E-mail: [Tymoteusz.Ciuk@itme.edu.pl](mailto:Tymoteusz.Ciuk@itme.edu.pl).

### LITERATURA

- [1] Baliga B. J., Silicon Carbide Power Devices: A 35 Year Journey from Conception to Commercialization, *76th Device Research Conference (DRC)*, 5 (2018), nr2, 1–2
- [2] Roccaforte F., La Via F., Raineri V., Ohmic Contacts To SiC, *SiC Materials And Devices*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2006), 77–116
- [3] Wang Z., Liu W., Wang C., Recent Progress in Ohmic Contacts to Silicon Carbide for High-Temperature Applications, *J. Electron. Mater.*, 45 (2016), nr1, 267-284