

doi:10.15199/48.2022.01.36

Badanie własności grubowarstwowego kontaktu srebro-węglik krzemu modyfikowanego wiązką laserową

Streszczenie. W pracy zaprezentowana jest metoda uzyskiwania kontaktów omowych do węglika krzemu z wykorzystaniem srebrowego kleju przewodzącego oraz lasera modyfikującego obszar kontaktu. Metoda nie wymaga przeprowadzania procesu wygrzewania całej struktury. Może ona znaleźć zastosowanie w pracach laboratoryjnych nad SiC wymagających szybkiego wytworzenia kontaktów omowych do struktur z SiC.

Abstract. The paper presents a method of obtaining ohmic contacts to silicon carbide with the use of a silver conductive adhesive and a laser beam modifying the contact area. The method does not require the whole structure annealing process. It can be used in laboratory work on SiC requiring rapid creation of ohmic contacts to SiC structures. (Investigation of the Properties of a Thick-Film Silver-Silicon Carbide Contact Treated by a Laser Beam).

Słowa kluczowe: SiC, kontakt omowy, laser

Keywords: SiC, ohmic contact, laser

Wstęp

Węglik krzemu jest materiałem półprzewodnikowym, którego technologia jest opanowana w stopniu wystarczającym do komercyjnej produkcji elementów elektronicznych. Nadal jednak materiał ten jest przedmiotem intensywnych badań koncentrujących się m.in. na tematyce wytwarzania dużych, niezdefektowanych podłoży monokrystalicznych SiC, opracowywaniu nowych technologii wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych w tym materiale czy też wpływu defektów na niezawodność uzyskiwanych przyrządów [1]. Doskonałe właściwości fizyczne węglika krzemu w połączeniu z dostępnością podłoży SiC zachęcają do realizacji projektów badawczych i wdrożeńowych dotyczących tego materiału.

Charakteryzacja elektryczna każdej struktury półprzewodnikowej wymaga przygotowania odpowiednich kontaktów. W klasyczny sposób realizowane są one przez naniesienie cienkiej warstwy bądź warstw wybranych metali oraz wygrzanie takiej struktury w wysokich temperaturach. W warunkach podwyższonej temperatury w obszarze interfejsu metal-półprzewodnik możliwe jest zachodzenie reakcji chemicznych i pojawianie się związków chemicznych umożliwiające uzyskanie kontaktu o charakterze liniowym. Etap wygrzewania kontaktów wpływa jednak nie tylko na same kontakty, ale na całą strukturę półprzewodnikową, co często pociąga za sobą liczne niepożądane konsekwencje.

W niniejszej pracy prezentujemy możliwość wykonania kontaktów omowych do węglika krzemu bez konieczności przeprowadzania procesu naporowania oraz późniejszego wygrzewania. Kontakt wykonywany jest w technologii grubowarstwowej przez naniesienie przewodzącego kleju srebrowego stosowanego w przemyśle elektronicznym. Omowy charakter interfejsu metal-półprzewodnik uzyskiwany jest poprzez lokalną modyfikację struktury krystalicznej węglika krzemu za pomocą wysokoenergetycznego impulsu laserowego w zakresie promieniowania podczerwonego. Zastosowanie oddziaływania laserowego pozwoliło na uzyskanie kontaktów o charakterze omowym dla podłoży 4H-SiC oraz 6H-SiC typu n.

Założenia technologii kontaktów

Wykonanie kontaktów elektrycznych do półprzewodnika w sposób klasyczny [2,9] wymaga wykonania fotolitografii z zastosowaniem dedykowanej maski, następnie naporowania warstwy metalu, trawienia i wygrzewania. Przeprowadzenie tych wszystkich procesów dla

pojedynczych próbek, które zwykle badane są w laboratorium jest kłopotliwe i czasochłonne. Szukając możliwości uproszczenia tego procesu zbadaliśmy czy możliwe jest wykonanie kontaktów omowych do węglika krzemu z wykorzystaniem dostępnego na rynku kleju przewodzącego oraz modyfikację jedynie obszaru kontaktu przy pomocy impulsu laserowego w celu uzyskania liniowej charakterystyki połączenia metal-półprzewodnik.

Możliwość wykorzystania impulsów laserowych do wytworzenia kontaktu omowego do SiC badana jest od ponad 20 lat [3]. W publikacjach autorzy deklarują, iż wykorzystanie impulsów laserowych daje lepsze efekty niż klasyczny proces RTA [4] Mimo upływu lat nadal jednak prace nad wykorzystaniem lasera do formowania kontaktów są prowadzone [5-7].

W proponowanym podejściu wytworzenia samej warstwy kontaktu wykorzystany został dostępny na rynku przewodzący klej srebrowy Mechanic MCN-DJ002 o zawartości srebra 80-90% i wielkość cząstek metalu 1-10µm. Do wygrzania obszarów kontaktów zastosowany został impulsowy laser IR ($\lambda=1060\text{nm}$) o mocy maksymalnej 20W. Szacowana średnica impulsu laserowego wynosi 20-30µm, a częstotliwość impulsów promieniowania wynosiła 20kHz. Układ sterowania wiązką lasera umożliwił rysowanie i skanowanie powierzchni o dowolnych kształtach z określoną liczbą powtórzeń. Założona szybkość przesuwu wiązki wynosi 100mm/s. Poprzez możliwość dostosowanie szerokiej gamy parametrów lasera w celu uzyskania efektu .

Sposób wykonania kontaktów

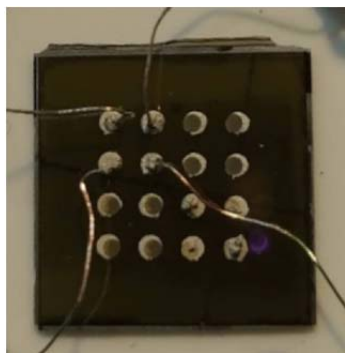
Testowe kontakty zostały wykonane na polerowanych podłożach 4H-SiC typu n o wymiarach 10mm×10mm. Na jednym podłożu wykonywane były cztery grupy struktur testowych składające się z czterech kontaktów okrągłych o średnicy 1mm (Rys. 1). Rozstaw kontaktów wynosił 2 mm. Klej przewodzący nanoszono metodą sitodruku przez maskę wykonaną z kaptonowej taśmy klejącej o grubości 0.08mm, w której otwory odsłaniające obszary kontaktów wycięte zostały techniką laserową. Tak naniesione kontakty, po wyschnięciu, poddane zostały oddziaływaniu skanującej wiązki laserowej. Analizowanymi parametrami była wartość mocy lasera wyrażona jako procent mocy maksymalnej oraz liczba repetycji cykli skanowania danej grupy kontaktów. Po przeprowadzeniu procesów laserowego skanowania powierzchni kontaktów do każdego pola kontaktowego dołączone zostały krótkie odcinki drutu

miedzianego umożliwiające dołączenie aparatury pomiarowej. Zastosowano technikę klejenia przy wykorzystaniu tego samego kleju przewodzącego, który użyty został do wykonania kontaktów.

Przyjęte wartości parametrów wiązki laserowej oraz sposób oznaczania poszczególnych próbek przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Przyjęte parametry wiązki laserowej i sposób oznaczania próbek.

% mocy maksymalnej	liczba powtórzeń			
	1x	3x	10x	30x
30%	#1x30	#3x30	#10x30	#30x30
40%	#1x40	#3x40	#10x40	#30x40

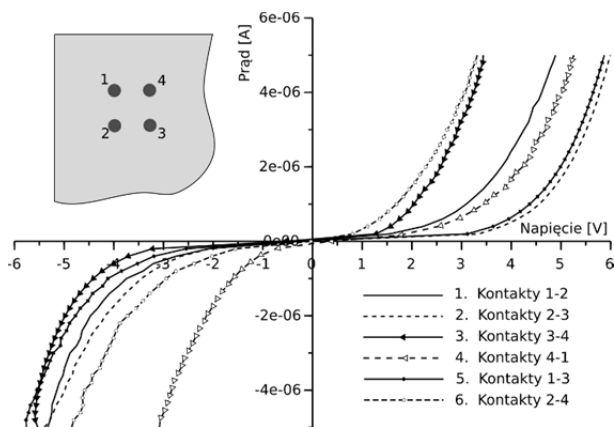


Rys. 1. Testowe kontakty na podłożu 4H-SiC. Obszary ciemniejsze oznaczają miejsca oddziaływania wiązki laserowej.

Charakterystyki I-V

Pomiary charakterystyk wykonane zostały na stanowisku pozwalającym na wyznaczanie rezystywności metodą Van Der Pauwa [8]. Stanowisko obejmuje stabilizowane źródło prądowo-napięciowe Keithley 2450 SMU, woltomierz 7.5 cyfry Keithley 7510 i zespół przekaźników realizujących odpowiednią konfigurację połączeń. Dla każdej grupy kontaktów mierzone były charakterystyki sześciu par kontaktów.

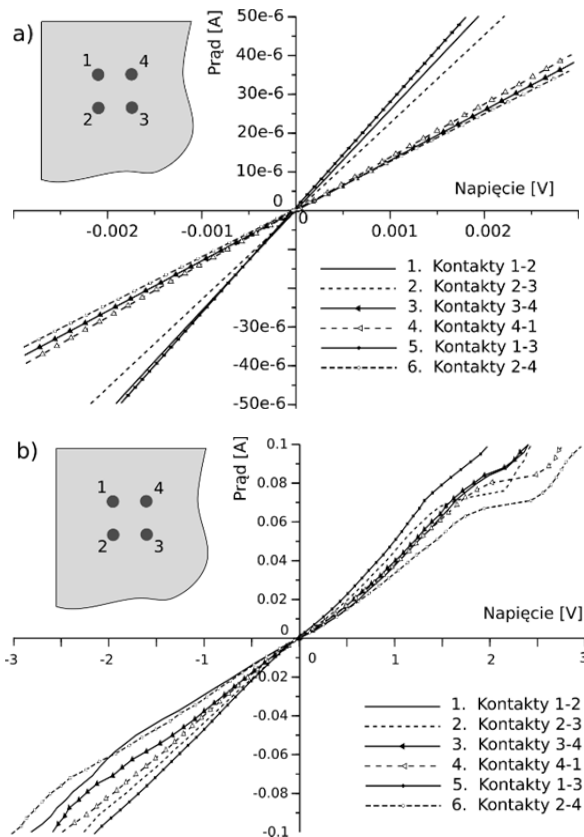
Punktem wyjściowym analizy było przygotowanie próbki z kontaktami wykonanymi przy użyciu kleju przewodzącego, które po wyschnięciu kleju nie zostały poddane oddziaływaniu wiązką laserową. Charakterystyki elektryczne uzyskane dla tych kontaktów przedstawione zostały na Rys. 2. Przedstawiają one typową, nieliniową zależność uzyskiwaną dla niewygrzanych złącz metal-węglik krzemu [9].



Rys. 2. Charakterystyki I-V kontaktów niemodyfikowanych laserem

W wyniku modyfikacji kontaktów wiązką laserową charakterystyki I-V, co prezentuje Rys. 3a,b, są w pełni liniowe. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż spadki napięcia

mają wartość pojedynczych mV przy prądzie $\pm 50\mu\text{A}$, czyli dla zakresu prądu o rząd większego, niż dla próbek niemodyfikowanych laserem. Charakterystyki zaprezentowane na Rys. 3 uzyskane zostały przy mocy lasera równej 40% mocy maksymalnej i 30-krotnej repetycji cykli skanowania w danym punkcie.



Rys. 3. Liniowe charakterystyki IV kontaktów modyfikowanych laserem. Próbka #30x40, a) pomiar dla prądów $\pm 50\mu\text{A}$, b) pomiar dla prądów $\pm 100\text{mA}$

Charakter kontaktów pozostaje omowy również dla prądów znacznie większych. Pomiar prezentowane na Rys. 3b. prezentują charakterystyki dla prądów w zakresie o ponad 3 rzędy większego; $\pm 100\text{mA}$. Dla prądów powyżej 50mA pojawiają się efekty związane z nagrzewaniem próbki.

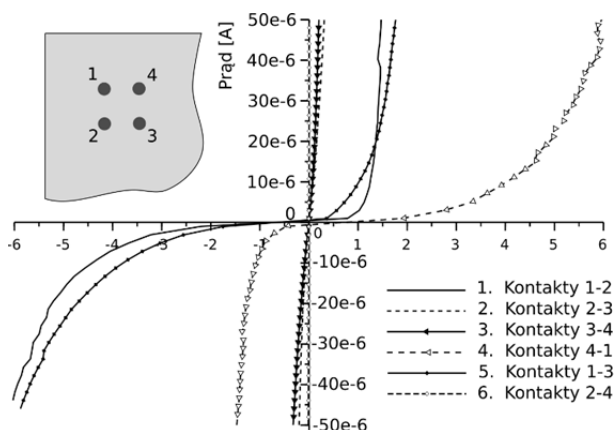
Kolejne pomiary zostały przeprowadzone na próbkach poddanych oddziaływaniu laserowemu o zmniejszonej mocy impulsów i mniejszej liczby repetycji cykli skanowania, zgodnie z Tabelą 1. Eksperyment ten pozwolił określić, przy jakich najniższych wartościach parametrów wiązki laserowej uda się osiągnąć kontakty o charakterze liniowym. Uzyskane wyniki zaprezentowane zostały w Tabeli 2.

Tabela 2. Charakter kontaktu: o – omowy, x – nieliniowy, ox – w grupie kontaktów występują pary liniowe i nieliniowe

% mocy maksymalnej	liczba powtórzeń			
	1x	3x	10x	30x
30%	ox	ox	ox	ox
40%	ox	ox	o	o

Jedynie w przypadku impulsu o mocy 40% mocy maksymalnej i 10- oraz 30 krotnej repetycji cykli skanowania wszystkie pary kontaktów wykazały charakter liniowy. Dla mniejszej mocy i mniejszej liczby repetycji charakterystyka elektryczna wykazała występowanie par o zróżnicowanych właściwościach elektrycznych.

Obejmowały one zarówno takie pary, które wykazywały liniową zależność I-V, oraz takie, dla których impulsy laserowe nie spowodowały zmiany nieliniowego charakteru kontaktu. Ilustruje to Rys. 4, na którym zaprezentowane są charakterystyki dla próbki #10x30.

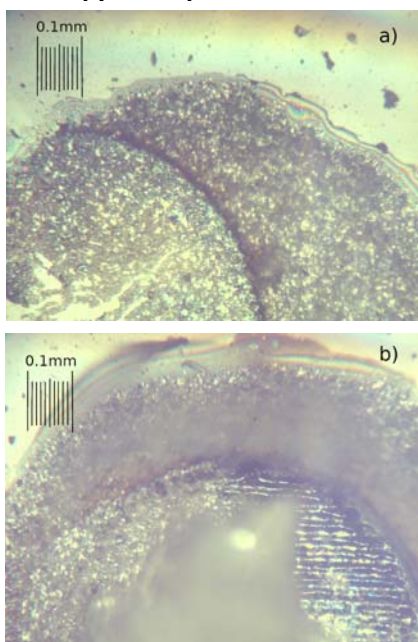


Rys. 4. Mieszany charakter kontaktów uzyskany dla próbki #10x30

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, iż zastosowanie techniki laserowej do modyfikacji właściwości elektrycznych kontaktów do węgliku krzemu istotnie wpływa na właściwości interfejsu metal-półprzewodnik i umożliwia uzyskanie kontaktu o charakterze omowym bez konieczności stosowania klasycznych technik wygrzewania metodami RTP.

Morfologia kontaktów

Efekt działania impulsu laserowego na powierzchnię kontaktu pokazany jest na rysunku 5.

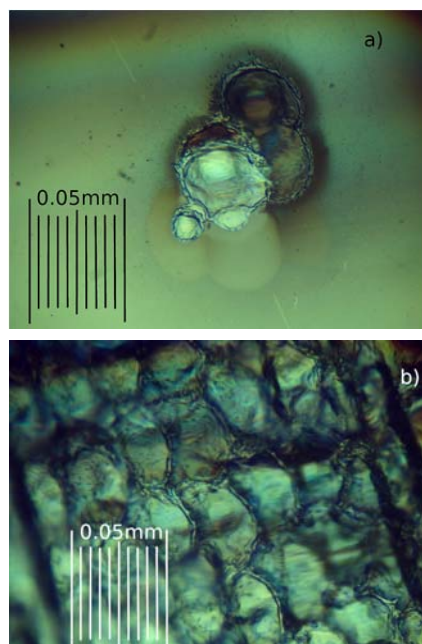


Rys. 5. Zdjęcia mikroskopowe kontaktów dla próbek: a) #3x40 i b) #30x40.

Na Rysunku 5a pokazany został kontakt po 3 krotnej repetycji cykli skanowania wiązką laserową dla mocy impulsu 40%. Widoczna jest wyraźna krawędź obszaru modyfikowanego laserem. Struktura ziarnista kleju jest nadal dostrzegalna. Istotna zmiana polegająca na odparowaniu części kontaktu srebrowego pojawia się wraz ze zwiększeniem zostaje liczby repetycji procesu skanowania laserowego. Na Rysunku 5b (próbka #30x40)

widoczna jest zmodyfikowana powierzchnia węgliku krzemu (po prawej stronie).

Przeprowadzono dodatkową weryfikację oddziaływania wiązki laserowej na podłoże SiC bez nałożonego kontaktu srebrowego. Próbka testowa, która została poddana działaniu lasera o mocy 40% mocy maksymalnej ma podobną strukturę powierzchni, jak próbki z nałożonym klejem przewodzącym. Jak pokazano na Rys. 6 uzyskane struktury w wyniku działania impulsu laserowego uległy lokalnemu stopieniu, a następnie krzepnięciu, przy czym powierzchnia poddana obróbce nie ma jednolitego charakteru, co sugeruje lokalne uszkodzenie regularnej struktury krystalicznej podłoża.



Rys. 6. Zdjęcia mikroskopowe powierzchni SiC poddanej działaniu wiązki laserowej: a) pojedyncze impulsy, b) seria 30 repetycji.

Dalsze badania wykazały, że wykonanie kontaktu z kleju srebrowego w miejscu wcześniej przeprowadzonej modyfikacji powierzchni węgliku laserem również skutkuje uzyskaniem oczekiwanych liniowych charakterystyki I-V. Oznacza to, iż mechanizm zapewniający uzyskiwanie liniowego charakteru kontaktów elektrycznych jest bezpośrednio związany z modyfikacją struktury kryształu węgliku krzemu uzyskiwaną w wyniku lokalnego i gwałtownego procesu stopienia kryształu i jego ponownemu zastąpieniu w formie amorficznej [10].

Przeprowadzone badania wskazują, że zastosowanie oddziaływania wiązką laserową ma istotne znaczenie dla jakości uzyskiwanych kontaktów do podłoża półprzewodnikowego, przy czym kluczowe znaczenie ma samo oddziaływanie wiązki z podłożem, zaś warstwa kleju przewodzącego może być nałożona zarówno przed, jak i po modyfikacji powierzchni SiC impulsami laserowymi.

Zastosowanie

Kontakty opisane w artykule wykorzystane zostały podczas pomiarów metodą Van Der Pauw'a ruchliwości Halla i koncentracji nośników w próbkach n-4H- i n-6H-SiC. W przypadku próbek 6H-SiC wcześniej wykonane przez naparowanie i wygrzane kontakty Ni okazały się nieliniowe. Dopiero kontakt grubowarstwowy Ag modyfikowany wiązką laserową pozwolił na wykonanie pomiarów ruchliwości i koncentracji nośników.

Podsumowanie

W pracy pokazano, iż możliwe jest wykonanie kontaktów omowych do węgliku krzemu przy użyciu modyfikacji powierzchni kryształu impulsami laserowymi. Proces nie wymaga przeprowadzania procesu wygrzewania całej próbki. W dalszych krokach planowana jest określenie zasięgu obszaru SiC, na który oddziałuje impuls laserowy. Konieczna jest również optymalizacja parametrów impulsu laserowego.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2013/09/B/ST7/04203 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Autorzy: dr inż. Janusz Woźny, dr inż. Andrzej Kubiak, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: janusz.wozny@p.lodz.pl, andrzej.kubiak@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] van Brunt, E., Burk, A., Lichtenwalner, D. J., Leonard, R., Sabri, S., Gajewski, D. A., Mackenzie, A., Hull, B., Allen, S., & Palmour, J. W., Performance and Reliability Impacts of Extended Epitaxial Defects on 4H-SiC Power Devices, *Materials Science Forum*, 924 (2018), 137–142
- [2] Kimoto, T., & Cooper, J. A., Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications, *John Wiley & Sons*, (2014).
- [3] Vlasov, I. I., Lyalin, A. A., Obratsova, E. D., Simakin, A. V., & Shafeev, G. A., Formation of ohmic contacts with SiC by laser ablation, *Quantum Electronics*, (1998), 28(8), 673.
- [4] Rupp, R., Kern, R., & Gerlach, R. Laser backside contact annealing of SiC power devices: A prerequisite for SiC thin wafer technology, *In 2013 25th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's*, (ISPSD), (2013), (pp. 51-54). IEEE.
- [5] De Silva, M., Ishikawa, S., Miyazaki, T., Kikkawa, T., & Kuroki, S. I., Formation of amorphous alloys on 4H-SiC with NbNi film using pulsed-laser annealing, *Applied Physics Letters*, (2016), 109(1), 012101.
- [6] Zhou, Z., He, W., Zhang, Z., Sun, J., Schöner, A., & Zheng, Z., Characteristics of Ni-based ohmic contacts on n-type 4H-SiC using different annealing methods, *Nanotechnology and Precision Engineering*, (2021), 4(1), 013006.
- [7] Sanzaro, S., Bongiorno, C., Badalà, P., Bassi, A., Franco, G., Vasquez, P., ... & La Magna, A., Inter-diffusion, melting and reaction interplay in Ni/4H-SiC under excimer laser annealing, *Applied Surface Science*, (2021), 539, 148218.
- [8] van der Pauw, L.J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape, *Philips Research Reports*, (1958), 13(2), 1-9.
- [9] Roccaforte, F., Vivona, M., Greco, G., Lo Nigro, R., Giannazzo, F., Rascunà, S., & Saggio, M., Metal/semiconductor contacts to Silicon Carbide: Physics and technology, *Materials Science Forum i Trans Tech Publications Ltd.*, (2018), 339-344
- [10] Choi, W. K., Optical, structural, and electrical properties of amorphous silicon carbide films, *Silicon-Based Material and Devices*. Academic Press, (2001). 1-71.