

Przegląd metod czyszczenia powierzchni podłoży SiC

Streszczenie. Zapewnienie wysokiego poziomu uzysku produkcyjnego w technologii półprzewodnikowej wymaga opracowania poszczególnych procesów technologicznych wytwarzania przyrządu oraz wysokiej jakości podłoża. Podstawowymi wskaźnikami jakości podłoży półprzewodnikowych jest gęstość określonego rodzaju defektów oraz poziom czystości powierzchni podłoży przed kolejnymi procesami. W niniejszym komunikacie dokonano przeglądu obecnego stanu wiedzy na temat metod przygotowania i czyszczenia powierzchni węgla krzemu

Abstract. Fabrication of an efficient, reliable and durable semiconductor device requires not only the development of specific technological processes used during its production, but also a high quality substrate. The quality of the substrate can be determined by the level of contamination of their surfaces and the presence of defects. They can interfere with proper operation or shorten the life of the instruments. This article reviews the current state of knowledge on the methods of preparation and cleaning of silicon carbide surfaces. (A review of SiC surface cleaning methods).

Słowa kluczowe: węglik krzemu, SiC, przygotowanie powierzchni SiC, technologia półprzewodnikowa.

Keywords: silicon carbide, SiC, SiC surface preparation, semiconductor technology.

Wprowadzenie

Monokrystaliczny węglik krzemu o heksagonalnej odmianie politypowej jest powszechnie wykorzystywanym materiałem półprzewodnikowym w technologii przyrządów mocy, pracujących także w zakresie wysokich częstotliwości. Stabilność chemiczna i termiczna węgla krzemu z jednej strony pozwala na pracę przyrządów w trudnych warunkach środowiskowych, takich jak promieniowanie wysokoenergetyczne lub wysoka temperatura, ale z drugiej strony komplikuje procesy technologiczne w porównaniu do technologii krzemowej. Problem dotyczy przede wszystkim przygotowania powierzchni przed kolejnymi procesami technologicznymi. Powtarzalność procesów czyszczenia zależy jednocześnie od gęstości defektów w podłożu. Pierwsze prace dotyczące technik usuwania niepożądanych zanieczyszczeń z powierzchni płytek półprzewodnikowych przeprowadzono w połowie lat sześćdziesiątych, jednak najwięcej osiągnięto w tym zakresie w okresie ostatniej dekady. Połączenie metod obróbki podłoży i ich czyszczenia pozwoliło na uzyskanie podłoży węgla krzemu o niskiej chropowatości powierzchni i wysokim poziomie czystości odpowiednich dla procesów epitaksji. Obecnie stosowane techniki przygotowania powierzchni dla typowych orientacji politypów 4H-SiC i 6H-SiC można uznać za dojrzałe. Metody czyszczenia politypu kubicznego (3C-SiC) wymagają dalszych badań [1].

Przygotowanie wstępne podłoży SiC

Rozważając aspekty związane z przygotowaniem powierzchni SiC nie należy pomijać zagadnień związanych z polerowaniem powierzchni. Większość stosowanych w tym celu metod została zaczerpnięta z technologii krzemowej. Typowo wymagały one modyfikacji ze względu na dużą twardość i niską reaktywność chemiczną SiC w porównaniu do krzemu. Istnieje wiele parametrów, które należy brać w tym przypadku pod uwagę, takich jak polityp, poziom domieszkowania, orientacja krystalograficzna powierzchni. Kompleksowe przygotowanie płytek SiC obejmuje cztery kolejne etapy:

- Szlifowanie: pozwala na poprawę parametrów geometrycznych płytki.
- Polerowanie mechaniczne: zmniejsza nierówności podłoża i udoskonala właściwości geometryczne płytki.
- Polerowanie chemiczno-mechaniczne, CMP (ang. *Chemical Mechanical Polishing*): zmniejsza gęstość rys na powierzchni lub uszkodzeń podpowierzchniowych.
- Czyszczenie: usuwa zanieczyszczenia pozostające na powierzchni [1].

Typowy proces CMP polega na tworzeniu chemicznie modyfikowanej warstwy na drodze oddziaływania czynników chemicznych substancji polerującej z podłożem. Jednocześnie powierzchnie chemicznie modyfikowane oddziałują mechanicznie z zawieszoną ścierną, czego skutkiem jest usuwanie uszkodzonych warstw materiału.

Poza metodami CMP mającymi na celu usunięcie uszkodzeń przypowierzchniowych i rys, badane są różne warianty trawienia powierzchni [2-7]. Najczęściej stosowaną metodą jest trawienie w atmosferze wodorowej [1]. Publikowane rezultaty dotyczą trawienia w atmosferze H₂, a także trawienia w mieszaninie wodoru z innymi związkami: H₂/HCl, H₂/C₃H₈, H₂/C₂H₄ w zakresie temperatur 1400°C -1700°C, dzięki którym spowalnia się przede wszystkim proces tworzenia tzw. kropelek krzemu (ang. *droplets*) powyżej jego temperatury topnienia w procesie epitaksji SiC. Wykazano wyraźne zalety wysokotemperaturowego trawienia w H₂ w porównaniu z innymi metodami przygotowania powierzchni SiC, takimi jak reaktywne trawienie jonowe, polerowanie tribochemiczne i elektrochemiczne polerowanie mechaniczne. Techniki wymienione powyżej i ich wpływ na strukturę powierzchni SiC wymagają dalszych badań [1].

Czyszczenie powierzchni SiC

Obecność jakichkolwiek obcych cząstek na powierzchni półprzewodnika może doprowadzić do problematycznych konsekwencji podczas kolejnych etapów wytwarzania przyrządu, np. kłopotów z adhezją warstw fotorezystu [8]. Problem jest szczególnie istotny w przypadku podłoży wykorzystywanych w procesie epitaksji, ponieważ cząstki stałe mogą prowadzić do zarodkowania defektów strukturalnych znacząco pogarszających jakość kryształu. Wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia powierzchni mają istotny wpływ na formowanie się bariery Schottky'ego, czyli na parametry elektryczne finalnego przyrządu [9-11]. Zidentyfikowano wiele typów zanieczyszczeń w zależności od źródła ich pochodzenia: otoczenie, pozostałości po cięciu podłoży, wykorzystywane w procesie roztwory chemiczne. Do najczęściej pojawiających się zanieczyszczeń powierzchni węgla krzemu należy zaliczyć cząstki organiczne, pozostałości fotorezystu, warstwy tlenku, cząstki i jony metali [8].

Proces czyszczenia powierzchni uwzględnia też odtłuszczenie, usuwanie warstwy tlenku, płukanie w wodzie dejonizowanej i suszenie azotem. Wszystkie kroki wymagają szczególnej uwagi przy doborze odczynników pod kątem ich stosowalności i jakości. Odtłuszczenie polega zwykle na kąpeli w izopropanolu w podwyższonej

temperaturze (80°C) w obecności ultradźwięków. Opracowano wiele metod czyszczenia właściwego SiC, gdyż jest to najistotniejszy etap przygotowania podłoża. Najczęściej stosowana i jednocześnie najbardziej dopracowana metoda mycia węgla krzemu wykorzystuje dobrze znaną z technologii krzemowej procedurę RCA (nazywaną też SC, ang. Standard Clean) i roztwór zwany „Piranią”. Procedura RCA została opracowana w 1965r. przez zespół Radio Corporation of America i opisana w roku 1970 [12]. Polega na dwustopniowym (SC1 i SC2) czyszczeniu w roztworach wodnych [13]:

– Przebieg procedury SC1: mycie w mieszaninie alkalicznej (5 H₂O : 1 H₂O₂(30%) : 1 NH₄OH(29%)). Udział poszczególnych składników mieszaniny może się różnić (od 5:1:1 do 7:2:1). Mycie odbywa się w czasie 5-10 min w mieszaninie o temperaturze 65°C -75°C z udziałem ultradźwięków. Mieszanina SC1 służy do usuwania zanieczyszczeń pochodzenia organicznego poprzez ich rozkład i rozpuszczanie, usuwając jednocześnie warstwę tlenku naturalnego SiO₂ znajdującą się na powierzchni płytki. Po zakończeniu mycia metodą SC1 podłoże wykazuje skłonność do formowania nowej warstwy SiO₂, w którą mogą wbudowywać się zanieczyszczenia. Nowa warstwa tlenku może zostać wytrawiona przed procedurą SC2 w dodatkowym kroku. W rezultacie usuwanie zanieczyszczeń jest dodatkowo ułatwione [14].

– Przebieg procedury SC2: mycie w roztworze kwasu chlorowodorowego (6 H₂O : 1 H₂O₂ (30%) : 1 HCl(27%)) pod wpływem ultradźwięków. Temperatura roztworu i czas czyszczenia są zbliżone do wartości w procedurze SC1. Proces umożliwia usuwanie jonów alkalicznych i kationów (np. glinu, żelaza, magnezu) oraz cząsteczek metali, które nie zostały usunięte podczas procedury SC1.

Roztwór „Pirania” składa się z kwasu siarkowego VI (98%) i nadtlenu wodoru (30%) w proporcjach 4:1. Proces mycia zachodzi w temperaturze roztworu 100-130°C i trwa co najmniej 10 minut. Proces służy do usuwania pozostałości fotorezystu oraz ciężkich związków organicznych. W przypadku węgla krzemu wykazano przewagę „Piranii” nad procedurą RCA [15].

Podczas procesu SC1 prawdopodobne jest formowanie warstwy tlenku (SiO₂), który zatrzymuje niektóre śladowe zanieczyszczenia. Sposobem na usunięcie tlenku jest trawienie w rozcieńczonym kwasie fluorowodorowym [12]. Wadą tego rozwiązania jest powszechna niewystarczająca czystość buforowanego kwasu HF, przez co podczas usuwania tlenku powierzchnia półprzewodnika może zostać dodatkowo zanieczyszczona cząstkami znajdującymi się w roztworze HF [14]. Kwas fluorowodorowy jest zazwyczaj rozcieńczany wodą dejonizowaną. Pozwala to na lepszą kontrolę procesu trawienia SiO₂. Inne warianty uwzględniają buforowanie kwasu fluorkiem amonu NH₄F. Zmodyfikowany proces określany jest jako BOE (ang. Buffered Oxide Etch) lub BHF (ang. Buffered HF). Proces jest stosowany między innymi w przypadkach, gdy istnieje potrzeba trawienia warstwy tlenku o dużej grubości [16].

Dużą uwagę poświęcono badaniom zwilżalności powierzchni SiC przygotowanej w różny sposób po trawieniu w HF [17-20]. Typ uzyskanej zwilżalności wynikowej będącej skutkiem zastosowania opisywanych procesów chemicznych oraz stanu początkowego podłoża przedstawiono w tabeli 1.

Usuwanie zanieczyszczeń jest zdecydowanie łatwiejsze z powierzchni trudno zwilżalnych o charakterze hydrofobowym. Udowodniono, że powierzchnie o charakterze hydrofilowym zatrzymują pewną część cząstek chemicznych w defektach strukturalnych, takich jak mikrokanaly. Korzystniejsze jest zatem z tego punktu widzenia uzyskanie hydrofobowej powierzchni SiC.

Niezależnie od skuteczności zastosowanej metody przygotowania powierzchni półprzewodnika istnieje duże ryzyko wtórnego zanieczyszczenia podczas następujących czynności, np. płukania w wodzie dejonizowanej o niedostatecznej jakości, niewłaściwe suszenie bądź przechowywanie.

Tabela 1. Zwilżalność 6H-SiC po procesie chemicznym w zależności od stanu początkowego powierzchni [17]

Proces	Typ zwilżalności powierzchni	
	6H-SiC (0001) po polerowaniu	6H-SiC (0001) po trawieniu tlenku w HF
Brak	Hydrofobowy	Hydrofilowy
SC1	Hydrofilowy	Hydrofilowy
SC2	Hydrofobowy	Hydrofilowy
10 H ₂ O: 1 HF	Hydrofobowy	Hydrofilowy
Pirania	Hydrofilowy	Hydrofilowy

Sprawdzone i opisane dotychczas metody czyszczenia stosuje się zarówno osobno, jak i w kombinacjach, tworząc najdogodniejsze warunki nie tylko do usuwania pozostałości niepożądanych substancji, ale także do poprawy właściwości powierzchni w zależności od charakteru kolejnych procesów technologicznych. Przykładem może być czyszczenie ozonem w obecności promieniowania ultrafioletowego przed wytwarzaniem warstwy SiO₂ metodą utleniania termicznego, poprawiające właściwości interfejsu SiO₂/SiC [1].

Najczęściej stosowane techniki

W ramach niniejszego komunikatu dokonano przeglądu blisko pięćdziesięciu prac dotyczących wytwarzania struktur na bazie węgla krzemu biorąc pod uwagę metody zastosowane w celu usuwania zanieczyszczeń z powierzchni podłoża. Wśród opublikowanych technik:

- ok. 65%: należy do metod mokrego czyszczenia chemicznego [12-38],
- ok. 13%: należy do procesów czyszczenia z wykorzystaniem plazmy [7,34-38],
- ok. 6%: należy do trawienia wodorowego [39-43],
- ok. 2%: należy do procesów czyszczenia ozonem [23,24],
- ok. 2%: należy do procesów czyszczenia z wykorzystaniem promieniowania laserowego [44,45],
- ok. 2%: należy do procesów bombardowania jonowego [46,47].

Częste stosowanie metod chemicznego czyszczenia powierzchni dowodzi ich silnej pozycji wśród obecnie dostępnych sposobów usuwania zanieczyszczeń z materiałów półprzewodnikowych. Pomimo dominującej przewagi liczebnej i faktu, że rezultatem stosowania tych technik przez dekady jest wysoki stopień ich dopracowania, coraz częściej badane są nowsze metody m.in. z wykorzystaniem plazmy oraz trawienia w H₂. Podjęto też próby ograniczenia etapu czyszczenia do polerowania bądź stosowania jedynie środowiska próżni [48]. Sposoby te jednak okazały się mało skuteczne. Wielu metodom, w celu poprawy skuteczności, towarzyszyło wygrzewanie podłoża i/lub obecność promieniowania ultrafioletowego. [31,46]. Według informacji dostarczonych przez autorów prac, najlepsze rezultaty osiągnięto po połączeniu ze sobą dwóch lub więcej metod przygotowania powierzchni.

Podsumowanie

Wśród znanych obecnie sposobów czyszczenia powierzchni węgla krzemu, dominującą pozycję zajmują metody mokrego czyszczenia chemicznego. Techniki te można uznać za dopracowane, choć nieopozbawione

pewnych wad, co doprowadziło do poszukiwania nowych, niekonwencjonalnych metod czyszczenia powierzchni SiC.

W celu dokładnego zbadania wpływu zanieczyszczeń powierzchni na jakość przyrządów potrzebne są dalsze eksperymenty i szczegółowa analiza danych statystycznych. Do chwili obecnej przedstawiono bardzo nieliczne rezultaty dotyczące tej problematyki [1,8].

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

Autorzy: mgr inż. Agnieszka Martychowicz, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: agnieszka.martychowicz.dokt@pw.edu.pl; mgr inż. Norbert Kwietniewski, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: norbert.kwietniewski@pw.edu.pl; dr hab. inż. Mariusz Sochacki, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: msochack@elka.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Monnoye, S., D. Turover, and P. Vicente. "Surface preparation techniques for SiC wafers." *Silicon Carbide*. Springer, Berlin, Heidelberg, (2004). 699-710.
- [2] Anzalone, Ruggero, et al. "Hydrogen etching influence on 4H-SiC homo-epitaxial layer for high power device." *Materials Science Forum*. Vol. 897. Trans Tech Publications, (2017).
- [3] Dulot, Frédéric, et al. "Structure and morphology of concave-shaped surfaces on 6H-SiC (0 0 0 1) after H₂ etching." *Applied surface science* 187.3-4 (2002): 319-325.
- [4] Hartman, J. D., et al. "Characterization of hydrogen etched 6H-SiC (0001) substrates and subsequently grown AlN films." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 21.2 (2003): 394-400.
- [5] Owman, Fredrik, et al. "Removal of polishing-induced damage from 6H-SiC (0001) substrates by hydrogen etching." *Journal of crystal growth* 167.1-2 (1996): 391-395.
- [6] Wang, J. J., et al. "Low damage, highly anisotropic dry etching of SiC." *1998 Fourth International High Temperature Electronics Conference. HITEC (Cat. No. 98EX145)*. IEEE, (1998).
- [7] Watanabe, Heiji, et al. "Surface Cleaning and Etching of 4H-SiC (0001) Using High-Density Atmospheric Pressure Hydrogen Plasma." *Journal of nanoscience and nanotechnology* 11.4 (2011): 2802-2808.
- [8] Jokubavicius, Valdas, Mikael Syväjärvi, and Rositsa Yakimova. "Silicon Carbide Surface Cleaning and Etching." *Advancing Silicon Carbide Electronics Technology I: Metal Contacts to Silicon Carbide: Physics, Technology, Applications* 37 (2018): 1.
- [9] Islam, Md M., and K. Das. "Effects of surface/interface states on Schottky contacts for 4H-SiC." *Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory, 2005. SSSST'05..* IEEE, (2005).
- [10] Plank, N. O. V., et al. "The electrical characteristics of 4H-SiC schottky diodes after inductively coupled plasma etching." *Journal of electronic materials* 32.9 (2003): 964-971.
- [11] Tournier, D., et al. "Impact of fine surface chemical-mechanical polishing on the manufacturing yield of 1200V SiC Schottky barrier diodes." *Proceedings. ISPSD'05. The 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, 2005..* IEEE, (2005).
- [12] Kern W., Puotinen D., „Cleaning Solutions Based on Hydrogen for Use in Silicon Semiconductor Technology“, *R.C.A. Rev.* 31 (1970) 187-206.
- [13] Kern, Werner. "The evolution of silicon wafer cleaning technology." *Journal of the Electrochemical Society* 137.6 (1990): 1887-1892.
- [14] Reinhardt, Karen, and Werner Kern, eds. *Handbook of silicon wafer cleaning technology*. William Andrew, (2018).
- [15] Sadow, Stephen E. *Silicon carbide biotechnology: a biocompatible semiconductor for advanced biomedical devices and applications*. Elsevier, (2012).
- [16] Nishi, Yoshio, and Robert Doering. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. CRC Press, 2007.
- [17] King, Sean W., Robert J. Nemanich, and Robert F. Davisa. "Wet Chemical Processing of (0001) Si 6H-SiC Hydrophobic and Hydrophilic Surfaces." *Journal of the Electrochemical Society* 146.5 (1999): 1910-1917.
- [18] Stambouli, V., et al. "Wettability study of SiC in correlation with XPS analysis." *Materials Science Forum*. Vol. 457. Trans Tech Publications, (2004).
- [19] Socha, R. P., K. Laajalehto, and P. Nowak. "Influence of the surface properties of silicon carbide on the process of SiC particles codeposition with nickel." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 208.1-3 (2002): 267-275.
- [20] King, Sean W., et al. "Ex situ and in situ methods for complete oxygen and non-carbidic carbon removal from (0001) Si 6H-SiC surfaces." *MRS Online Proceedings Library Archive* 423 (1996).
- [21] Madani, Mohammad, et al. "SiC cleaning method by use of dilute HCN aqueous solutions." *Journal of The Electrochemical Society* 155.11 (2008): H895-H898.
- [22] Hattori, N., et al. "Investigation of SiC clean surface and Ni/SiC interface using scanning tunneling microscopy." *Applied surface science* 216.1-4 (2003): 54-58.
- [23] Afanas' ev, V. V., et al. "Elimination of SiC/SiO₂ interface states by preoxidation ultraviolet-ozone cleaning." *Applied physics letters* 68.15 (1996): 2141-2143.
- [24] Prudkovskiy, V. S., et al. "High robustness of epitaxial 4H-SiC graphene to oxidation processes." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1124. No. 8. IOP Publishing, (2018).
- [25] Coletti, Camilla, et al. "Biocompatibility and wettability of crystalline SiC and Si surfaces." *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEEM*. IEEE, (2007).
- [26] Harrell, William R., Jingyan Zhang, and Kelvin F. Poole. "Aluminum Schottky contacts to n-type 4H-SiC." *Journal of Electronic Materials* 31.10 (2002): 1090-1095.
- [27] Lee, Dohyun, et al. "Improving the barrier height uniformity of 4H-SiC Schottky barrier diodes by nitric oxide post-oxidation annealing." *IEEE Electron Device Letters* 35.8 (2014): 868-870.
- [28] Lodzinski, M., et al. "Characterization of MOS interfaces on protected and un-protected 4H-SiC surfaces." *2008 26th International Conference on Microelectronics. IEEEM*. IEEE, (2008).
- [29] Lohrmann, A., et al. "Activation and control of visible single defects in 4H-, 6H-, and 3C-SiC by oxidation." *Applied Physics Letters* 108.2 (2016): 021107.
- [30] Shenoy, J. N., et al. "Characterization and optimization of the SiO₂/SiC metal-oxide semiconductor interface." *Journal of electronic materials* 24.4 (1995): 303-309.
- [31] Tengeler, Sven, et al. "The (001) 3C SiC surface termination and band structure after common wet chemical etching procedures, stated by XPS, LEED, and HREELS." *Applied Surface Science* 427 (2018): 480-485.
- [32] Chanthaphan, Atthawut, et al. "Structure and Surface Morphology of Thermal SiO₂ Grown on 4H-SiC by Metal-Enhanced Oxidation Using Barium." *Materials Science Forum*. Vol. 897. Trans Tech Publications, (2017).
- [33] Liu, Bingbing, et al. "Chemical and electronic passivation of 4H-SiC surface by hydrogen-nitrogen mixed plasma." *Applied Physics Letters* 104.20 (2014): 202101.
- [34] Chen, Su Hua. "The Study of SiC Surface Cleaning By Hydrogen Plasma." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 473. Trans Tech Publications, (2014).
- [35] Das, M. K., J. A. Cooper, and M. R. Melloch. "Effect of epilayer characteristics and processing conditions on the thermally oxidized SiO₂/SiC interface." *Journal of electronic materials* 27.4 (1998): 353-357.
- [36] Lo, T. C., and H. C. Huang. "Optical and electrical measurements of a-SiC: H/c-Si heterojunctions prepared by plasma enhanced chemical vapour deposition." *Electronics Letters* 28.15 (1992): 1423-1424.
- [37] Zhang, Yuming, Yimen Zhang, and Xinjun Niu. "The study of Ni/4H-SiC SBD." *2001 6th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. Proceedings (Cat. No. 01EX443)*. Vol. 2. IEEE, (2001).
- [38] Losurdo, Maria, et al. "Study of the temperature-dependent interaction of 4H-SiC and 6H-SiC surfaces with atomic hydrogen." *Applied physics letters* 84.20 (2004): 4011-4013.

- [39] Bolen, Michael L., et al. "Graphene formation mechanisms on 4H-SiC (0001)." *Physical Review B* 80.11 (2009): 115433.
- [40] Anzalone, Ruggero, et al. "Hydrogen etching influence on 4H-SiC homo-epitaxial layer for high power device." *Materials Science Forum*. Vol. 897. Trans Tech Publications, (2017).
- [41] Owman, Fredrik, et al. "Removal of polishing-induced damage from 6H-SiC (0001) substrates by hydrogen etching." *Journal of crystal growth* 167.1-2 (1996): 391-395.
- [42] Frewin, Christopher L., et al. "A comprehensive study of hydrogen etching on the major SiC polytypes and crystal orientations." *Materials science forum*. Vol. 615. Trans Tech Publications, (2009).
- [43] Yoh, Kanji, Keita Konishi, and Hiroki Hibino. "Epitaxial graphene FETs with high on/off ratio grown on 4H-SiC." *2009 9th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)*. IEEE, (2009).
- [44] Sues, Manuela, et al. "Effect of pulsed laser irradiation on the SiC surface." *International Journal of Applied Ceramic Technology* 14.3 (2017): 313-322.
- [45] Vanko, Gabriel, et al. "Laser ablation: A supporting technique to micromachining of SiC." *The Ninth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems*. IEEE, (2012).
- [46] Suga, Tadatomo, et al. "Direct bonding of SiC by the surface activated bonding method." *2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*. IEEE, (2014).
- [47] Mu, Fengwen, et al. "Room-temperature wafer bonding of SiC-Si by modified surface activated bonding with sputtered Si nanolayer." *Japanese Journal of Applied Physics* 55.4S (2016): 04EC09.
- [48] Xue, Qizhen, et al. "Two-step preparation of 6H-SiC (0001) surface for epitaxial growth of GaN thin film." *Applied physics letters* 74.17 (1999): 2468-2470.