

prof. dr hab. Antoni Ciszewski
Uniwersytet Wrocławski
Wydział Fizyki i Astronomii
Instytut Fizyki Doświadczalnej
pl. Maksa Borna 9
50-204 Wrocław

Opinia o pracy doktorskiej pana mgra Piotra Cichonia zatytułowanej „Graphitization of SiC in Si flux”.

Zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego powołującą mnie na recenzenta, przedstawiam pisemną ocenę rozprawy doktorskiej pana mgra Piotra Cichonia doktoranta tego Wydziału (nr indeksu: 1055107). Praca jest napisana w języku angielskim. Składa się z pięciu rozdziałów i bibliografii. Jest streszczona po angielsku i po polsku. Promotorem w postępowaniu o nadanie stopnia jest pan prof. dr hab. Jacek Kołodziej. W przedstawionej bibliografii mgr Piotr Cichoń odwołuje się między innymi do dwóch prac, których jest współautorem: publikacji w Appl. Phys. A 124 (2018) i pracy wysłanej do druku w App. Surf. Sci., aktualnie recenzowanej. Z informacji kończącej dysertację wynika, że przynajmniej część badań stanowiących podstawę ocenianej pracy była finansowana z grantów NCN (grant nr 2014/15/N/ST5/00523) i MNiSW (decyzje nr 7150/E-338/M/2015, 7150/E-338/M/2017 i grant 14.2017 2017-06-29 w ramach programu Inkubatora Innowacyjności).

Przedmiotem rozprawy są zagadnienia związane z nukleacją, wzrostem oraz rozpadem grafenu na powierzchni (0001) węgla krzemu w obecności par krzemu pochodzących z zewnętrznego strumienia. Doktorant przedstawił propozycję nowego sposobu wytwarzania grafenu. Propozycja jest oparta na przeprowadzonych przez niego badaniach doświadczalnych, stanowiących podstawę dysertacji. W wielu miejscach słusznie podkreślił, że grafen jest bardzo obiecującym materiałem o wyjątkowo dużych możliwościach zastosowań, którego wdrożenia technologiczne znajdują się ciągle na etapie nie w pełni zadowolających prób.

W pierwszym rozdziale, zwięźle i wyczerpująco jak na potrzeby ocenianej pracy, podsumował aktualną wiedzę na temat grafenu, jego budowy i właściwości. Wymienił i scharakteryzował metody wytwarzania tego materiału, szczególną uwagę zwracając na te, w których wykorzystywana jest powierzchnia SiC(0001). Bardzo dobrze wyjaśnił i poparł odpowiednimi cytatami, dlaczego i w jakiej sytuacji fizykochemicznej struktura i morfologia tej powierzchni spełniają warunki, w których może się tworzyć na niej grafen.

Wykorzystane przez Doktoranta techniki charakteryzacji próbek (XPS, ARPES, LEED, AFM i STM) należą do najnowocześniejszych i najgłębiej wnikających w strukturę materii technik

pomiarowych stosowanych w badaniach powierzchni fazy skondensowanej. Oparte na nich metody pomiarowe, które stosował w swoich badaniach, przedstawił prosto i zrozumiale w rozdziale drugim dysertacji. W tym samym rozdziale klarownie został opisany układ próżniowy, w którym były przygotowywane i częściowo charakteryzowane próbki, źródło strumienia par krzemu oraz zaprezentowany ogólny schemat proponowanej przez Doktoranta metody wytwarzania grafenu.

Rozdział trzeci poświęcony jest omówieniu własnych wyników badań grafityzacji powierzchni SiC(0001) wystawionej na zewnętrzny strumień par Si. W szczególności wpływu na własności warstw grafenowych takich parametrów jak temperatura i czas wygrzewania powierzchni oraz strumień par Si. Z przedstawionych rezultatów wynika, że w porównaniu z powstającymi na powierzchni Si(0001) nie eksponowanej na strumień Si, warstwy grafenu w obecności zewnętrznego strumienia par Si zaczynają się tworzyć w wyższej temperaturze, w wyniku czego są mniej zdefektowane. Lepiej jest również uporządkowana warstwa buforowa. Dobrze przedstawiony materiał doświadczalny jest obszerny a wnioski wynikające z omawianych wyników pomiarów są przekonujące. Moim zdaniem wykresy na Rys. 28 (b) i (c) powinny być bardziej szczegółowo przedyskutowane w tekście. Na wykresach zaznaczyłbym położenia pików pochodzących od podłoża SiC i fazy SiC'. Bardzo czytelne są tabelowe zestawienia wyników. Jakość powstających warstw grafenu dobrze ilustrują wyniki zastosowanych komplementarnie badań ARPES, STM i AFM. Badania mikroskopowe pokazują, że wzrost strumienia Si poprawia strukturę stopni atomowych podłoża, zapobiegając ich grupowaniu się.

W pierwszej części rozdziału czwartego Doktorant dyskutuje zjawiska zachodzące na powierzchni w pobliżu zdeterminowanej wielkością strumienia par Si wartości temperatury wygrzewania, poniżej której grafityzacja powierzchni cofa się i powstaje nowa faza SiC'. Sugeruje, że reakcja syntezy tej fazy jest procesem odwracalnym. Co intuicyjnie jest poprawne, ale czego nie może jednoznacznie wykazać biorąc pod uwagę ilość i złożoność procesów zachodzących na powierzchni równocześnie. Zaproponowany opis jest bardzo uproszczony, jednak w żadnym wypadku nie osłabia głównej tezy dysertacji, że przez odpowiednią zmianę parametrów badanego układu można sterować wzrostem i rozpadem warstw grafenowych. Stwarza to możliwość produkcji grafenu o pożądanymi właściwościami. W dalszej części rozdziału Doktorant pokazuje i bogato ilustruje wynikami przeprowadzonych badań możliwości zaproponowanej w dysertacji metody wytwarzania grafenu. Przekonująco dowodzi, że otrzymane w toku badań warstwy są izotropowe na odpowiednio dużych obszarach i posiadają wymaganą do ewentualnych zastosowań strukturę atomową i elektronową, a opisana metoda pozwala na syntezę jedno- i wielowarstwowego grafenu bezpośrednio na izolującym podłożu. Lektura tego rozdziału przekonuje, że pan mgr Piotr Cichoń potrafi w sposób przejrzysty przedstawić cel oraz rezultaty zaplanowanych badań, przeprowadzić analizę otrzymanych wyników i klarownie wyartykułować wyływające z tej analizy wnioski. Wysoko oceniam wartość naukową zreferowanych wyników, które uważam za oryginalne i bardzo interesujące. Dysertację kończy esencjonalne podsumowanie i obszerna bibliografia.

Praca jest napisana z dużą dbałością o przejrzystość opisu. Poprawność językową uważam za bardzo dobrą z zastrzeżeniem, że nie jestem kompetentnym do jej oceny. Chociaż redakcyjnie praca prezentuje się satysfakcjonująco (dobrej jakości rysunki i godna pochwały

dbałość w zaznaczaniu źródeł pochodzenia), sędzę, że ostateczna redakcja musiała sprawić Doktorantowi pewne trudności. Najczęściej spotykanym niedopatrzaniem są błędne odnośniki do rysunków i cytowanych prac (własnych). Niżej przedstawiam uchybienia, które zauważyłem:

str. 27 „The scheme of an experiment is shown in Fig. 12” chyba powinno być in Fig. 17;

str. 33 “The typical setup of a LEED experiment is shown in Fig. 15” raczej in Fig.20;

str. 43 błąd w cytowaniu w podpisie do Rys. 24, powinno być [128] (?);

str. 54 “the three samples from Fig. 24” nie wiem do którego rysunku to odwołanie, może do Rys. 28 lub Rys. 29?

str. 62 są dwa odwołania do Rys. 28(a), które raczej powinny być do 34(a) (?);

str. 63 są odwołania do Rys. 29 a powinny chyba być do 35?

str. 65 jest odwołanie do Fig. 6(c) a powinno być do 35(c) (chyba?);

str. 69 odwołanie do sekcji 2.6 a powinno być 1.6;

str. 70 w podpisie pod Rys. 38 „reprinted from own work [132]” ale to nie jest ten odnośnik?

Na podstawie przedstawionej mi do oceny dysertacji, mogę stwierdzić, że Doktorant posiada rozległą wiedzę teoretyczną dotyczącą własności i metod wytwarzania grafenu. Jest bardzo dobrze zaznajomiony z doświadczalnymi technikami charakteryzacji powierzchni: XPS, ARPES, LEED, AFM i STM. Za oryginalną uważam przedstawioną w dysertacji metodę wytwarzania grafenu. W moim przekonaniu zdobył niezbędne kwalifikacje wymagane od fizyka doświadczalnika ze stopniem naukowym doktora.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pana mgra Piotra Cichonia odpowiada normom i przepisom o rozprawach doktorskich określonym w odpowiednich artykułach Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych i wnoszę o dopuszczenie jej do obrony, a autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Stawiam również wniosek o jej wyróżnienie.

Wrocław, 22 sierpnia 2020 roku.



prof. dr hab. Antoni Ciszewski