

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 30 marca 2017 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 13 kwietnia 2017 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Tymoteusza Ciuka

temat: “Application of epitaxial graphene layers on silicon carbide in the technology of semiconductor devices”

promotor – prof. dr hab. inż. Jan Szmidt z Politechniki Warszawskiej

promotor pomocniczy – dr inż. Włodzimierz Strupiński z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych

recenzenci:

prof. dr hab. inż. Vitalii Dugaev z Politechniki Rzeszowskiej

prof. dr hab. inż. Tadeusz Pisarkiewicz z Akademii Górniczo-Hutniczej

Obrona odbędzie się w dniu 13 kwietnia 2017 r. w Audytorium Centralnym na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 10.00.

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electronics
and Information Technology**

Ph.D. THESIS

Tymoteusz Ciuk, M.Sc.

**Application of epitaxial graphene layers on silicon carbide
in the technology of semiconductor devices**

Supervisor
Professor Jan Szmidt, Ph.D., D.Sc.

Warsaw, 2016

Abstract

The dissertation has the form of a collection of four articles published by the author in renowned scientific journals. The articles are prefaced with an introduction to graphene's history, its fundamental principles and synthesis overview, as well as a guide through the electrical properties of epitaxial *Chemical Vapour Deposited* (CVD) graphene on silicon carbide and the technology and properties of a graphene-based magnetic field sensor in reference to the authored publications.

The author contributes to the state of the art through the experimental determination of the *intrinsic* charge carrier concentration and charge carrier mobility in hydrogen-intercalated quasi-free-standing monolayer and quasi-free-standing bilayer graphene epitaxially grown by *Chemical Vapour Deposition* on semi-insulating on-axis 4H-SiC(0001) and 6H-SiC(0001) substrates, and verifies the theoretically postulated explanation for the origin of the *intrinsic* doping type and level based on the spontaneous polarisation of the hexagonal polytypes of silicon carbide.

Additionally, the author develops a method and experimentally determines the inherent anisotropy in graphene's sheet resistance and the resultant anisotropy in graphene's offset voltage that have their origin in the characteristic morphology of silicon carbide surface marked with a pattern of terraces and step edges.

Based on the collected knowledge and experience the author assesses the applicability of quasi-free-standing epitaxial graphene on silicon carbide in magnetic field detection and verifies its suitability for an electron-beam lithographically defined device processing.

Finally, he develops a technology of a complete, electrically stable and environmentally resistant, classical Hall effect sensor based on epitaxial *Chemical Vapour Deposited* hydrogen-intercalated quasi-free-standing monolayer graphene on silicon carbide and determines its room-temperature electrical and magnetic properties, thus proving graphene's potential in the technology of electronic devices.

Streszczenie

Tytuł: *Zastosowanie epitaksjalnych warstw grafenowych na węglu krzemu w technologii przyrządów półprzewodnikowych*

Praca doktorska ma formę zbioru czterech artykułów własnych opublikowanych w uznanych czasopismach naukowych, opatrzonych odpowiednim wprowadzeniem obejmującym zarys historyczny, podstawowe właściwości grafenu i przegląd metod jego wytwarzania, oraz przewodnikiem obejmującym prace autorskie nad właściwościami elektrycznymi grafenu epitaksjalnego wytwarzanego metodą chemicznego osadzania z fazy lotnej (CVD) na węglu krzemu oraz technologią i właściwościami grafenowego czujnika pola magnetycznego.

Oryginalny wkład autora w rozwój dyscypliny wyraża się poprzez eksperymentalne wyznaczenie swoistej koncentracji i ruchliwości nośników ładunku w interkalowanej wodorem quasi-swobodnej warstwie pojedynczej i quasi-swobodnej warstwie podwójnej grafenu epitaksjalnego wytworzonego metodą chemicznego osadzania z fazy lotnej na półizolacyjnych nieodchylonych podłożach 4H-SiC(0001) i 6H-SiC(0001), oraz weryfikację postulowanego teoretycznie mechanizmu indukowania ładunku w grafenie w wyniku oddziaływania spontanicznej polaryzacji heksagonalnych politypów węgla krzemu.

Dodatkowo, autor opracowuje metodę i dokonuje pomiaru właściwej grafenowi anizotropii rezystancji powierzchniowej i wynikającej z niej anizotropii napięcia niezrównoważenia, wywołanych charakterystyczną, naznaczoną tarasami i uskokami, morfologią powierzchni węgla krzemu.

Na podstawie zgromadzonej wiedzy i doświadczenia autor dowodzi potencjału aplikacyjnego quasi-swobodnego grafenu epitaksjalnego na węglu krzemu w technologii czujników pola magnetycznego i weryfikuje jego zgodność z wymogami stawianymi przez litografię elektronową.

Ostatecznie, autor opracowuje pełen cykl technologiczny, stabilnego elektrycznie i zabezpieczonego przed wpływem czynników środowiskowych, grafenowego czujnika pola magnetycznego działającego w oparciu o klasyczny efekt Halla, wytworzonego na bazie interkalowanej wodorem quasi-swobodnej warstwy pojedynczej grafenu epitaksjalnego wytworzonego metodą CVD na węglu krzemu, oraz dokonuje pomiaru jego właściwości elektrycznych i magnetycznych w temperaturze pokojowej, dowodząc tym samym potencjału grafenu w technologii przyrządów elektronicznych.

Politechnika Rzeszowska
Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej
Katedra Fizyki i Inżynierii Medycznej
Al. Powstańców Warszawy 6
35-959 Rzeszów
tel. 17-865 1917
e-mail: vdugaev@prz.edu.pl

KWESTIONARIUSZ-RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy: "Application of epitaxial graphene layers on silicon carbide in the technology of semiconductor devices"

Autor rozprawy: M. Sc. Tymoteusz Ciuk

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Rozprawa dotyczy wyjaśnienia możliwości zastosowania epitaksjalnych warstw grafenowych, które były otrzymane metodą osadzenia chemicznego na węglu krzemu, w technologii przyrządów półprzewodnikowych. Zagadnienie naukowe składa się z wyznaczenia pewnych podstawowych właściwości elektrycznych, związanych z koncentracją i ruchliwością nośników prądu elektrycznego oraz wyjaśnienia potencjału aplikacyjnego grafenu epitaksjalnego w technologii czujników pola magnetycznego. Główna teza rozprawy (zastosowanie epitaksjalnego grafenu na węglu krzemu w technologii przyrządów półprzewodnikowych) została sformułowana wystarczająco jasno. Jest to bardzo istotna i teraz bardzo aktualna teza naukowa. Rozprawa ma charakter doświadczalny, została przedstawiona w formie zbioru czterech artykułów i wprowadzenia (zarys historyczny, opis właściwości grafenu i metod jego wytwarzania). W publikacjach i rozszerzonym streszczeniu Autor przedstawił wyniki badań anizotropii rezystancji dla grafenu na podłożu SiC, wpływ koncentracji i ruchliwości nośników prądu na właściwości transportowe i przedstawił parametry hallotronu (elementu Halla).

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle/ świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Autor rozprawy przeprowadził analizę źródeł w sposób całkiem właściwy. Spis literatury umieszczony w rozszerzonym streszczeniu zawiera 90 źródeł, którymi są przeważnie artykuły opublikowane w ostatnich latach w czasopiśmie o bardzo wysokim punktowaniu. Literatura głównie związana jest z opisem właściwości elektronowych grafenu, technologii epitaksjalnego grafenu i wyjaśnieniu tego jak technologia i wybór podłoża są związane z właściwościami elektronicznymi tego materiału. Analiza literatury została przeprowadzona we wstępnej części każdego z czterech

opublikowanych artykułów Autora, które stanowią część główną rozprawy. Świadczy to o dostatecznej i głębokiej wiedzy Pana mgr. T. Ciuka. Wnioski z przeglądu zebranych źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Postawione zagadnienia zostały rozwiązane przede wszystkim przez wykorzystanie właściwego materiału badań, którym jest epitaksjalny grafen na podłożu SiC interkalowany wodorem, oraz właściwej metody pomiarów efektu Halla, anizotropii oporu, użyciu mikroskopii skaningowej i spektroskopii Ramanowskiej powierzchni grafenu. Autorowi rozprawy udało się ustalić wartości rezystancji, którą stanowią pewne defekty struktury grafenu czyli krawędzi tarasów (step edges) podłoża w interkalowanym wodorem dwuwarstwowym grafenie, w zależności od parametrów geometrycznych – wysokości, szerokości i orientacji takich tarasów. Z przeprowadzonych badań wynikało, że wpływ tego rodzaju defektów przede wszystkim jest związany z lokalną zmianą koncentracji nośników prądu. Okazało się, że koncentracja nośników istotnie maleje w pobliżu krawędzi tarasu co powoduje wzrost oporu. Natomiast mechaniczne odkształcenia na krawędzi tarasów nie powodują znacznej zmiany oporu. Prócz tego, przeprowadzone badania quasi-swobodnej monowarstwy (quasi-free-standing monolayer) grafenu wyjaśnili, że głównym mechanizmem anizotropii oporu jest zmiana lokalnej koncentracji i ruchliwości elektronów na krawędziach tarasów w SiC, a nie „domieszkowanie” (as-grown doping) związane z polaryzacją spontaniczną SiC podłoża, tak jak często twierdzono do tej pory w literaturze.

W wyniku przeprowadzonych przez Autora badań zostało ustalone, że epitaksjalny grafen chemicznie osadzony na powierzchni węgla krzemu może być wykorzystany do budowy czujnika Halla pola magnetycznego. Przy tym, napięcie niezrównoważenia (offset voltage) związane z anizotropią przewodnictwa, które negatywnie wpływa na precyzję czujnika Halla, można istotnie zmniejszyć przez wybór pewnej orientacji próbki grafenu na SiC względem kierunku krawędzi tarasów na powierzchni węgla krzemu. Został także przedstawiony element Halla jako przyrząd operacyjny, a jego najważniejsze parametry zostały ustalone. Z tego wynika, że przyrząd jest faktycznie gotowy do produkcji przemysłowej w skali komercyjnej. Uważam, że właśnie to jest najlepszym potwierdzeniem, że Pan mgr T. Ciuk użył właściwej metody badań, dobrze uzasadnił przyjęte założenia, a w wyniku skutecznie rozwiązał postawione cele. Innymi słowy, główna postawiona teza rozprawy została tym jednoznacznie potwierdzona.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy polega na tym, że badania właściwości grafenu zostały przeprowadzone w oparciu na pewne charakterystyczne zjawiska, które są związane z wykorzystaniem pewnej wybranej technologii wytwarzania i interkalacji grafenu na SiC. Na dzień dzisiejszy podstawowe właściwości dwuwymiarowego grafenu zostały szczegółowo opisane w dość dużej ilości artykułów oryginalnych, prac przeglądowych i w książkach wydanych w ciągu ostatnich lat. Z innej strony, pokazano również, że nawet te podstawowe właściwości mogą ulegać bardzo istotnym zmianom w zależności od materiału podłoża i technologii wytwarzania grafenu. Chyba jednym z najważniejszych jest obecność defektów, których część jest spowodowana wyborem materiału, jego morfologii i doskonałości

podłoża. Istotną rolę w tym odgrywają defekty na powierzchni węgla krzemu. Właśnie okazało się, że tarasy i uskoki na tej powierzchni powodują lokalne zmiany koncentracji elektronów w grafenie wzdłuż krawędzi tarasów oraz anizotropię rezystancji.

Samodzielny dorobek Autora stanowiły przeprowadzone badania eksperymentalne, w tym pomiary oporu i anizotropii rezystancji, efektu Halla, analiza wyników mikroskopii elektronowej i spektroskopii Ramanowskiej. Oryginalny dorobek stanowi także opracowanie statystyki wyników pomiarowych. Taka statystyka i analiza danych przy dość dużej ilości parametrów daje możliwość w najlepszy sposób oszacować wpływ różnych parametrów na anizotropię rezystancji, ruchliwość i koncentrację elektronów w grafenie, oraz możliwy rozrzut mierzonych wielkości. Uważam, że właśnie w ten sposób w rozprawie została potwierdzona wiarygodność przedstawionych wniosków. Trzeba także podkreślić ważność wykonanego przez Autora pełnego cyklu technologicznego w konstruowaniu czujnika pola magnetycznego.

Przedstawione wyniki stanowią znaczący wkład w rozwinięcie fizyki epitaksjalnego grafenu na podłożu. Uważam, że te wyniki znajdują się na poziomie światowym wiedzy o grafenie. O tym również świadczą publikowane artykuły z uczestnictwem Autora w najbardziej renomowanych czasopismach, wystąpienia na międzynarodowych konferencjach o grafenie, a także uczestnictwo jako wykonawca w największych Europejskich projektach badawczych związanych z grafenem.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Uzyskane wyniki zostały przedstawione przez Autora w formie czterech artykułów o bardzo wysokim punktowaniu oraz rozszerzonego streszczenia z wprowadzeniem historycznym, sformułowaniem tez i celów rozprawy, oraz opisem właściwości, metody wytwarzania i interkalacji dwuwarstwowego grafenu. Prócz czterech artykułów przedstawionych jako część rozprawy, Pan mgr T. Ciuk opublikował jeszcze 12 prac, dostał 2 patenty, miał 13 prezentacji na konferencjach i uczestniczył w 10 projektach badawczych – to wszystko zostało także opisano w rozszerzonym streszczeniu. Całe to streszczenie razem z 11 rysunkami obejmuje 76 stron (bez załączonych artykułów). Wszystkie wyniki są szczegółowo omówione w artykułach i streszczeniu, wystarczająco przedyskutowane, i wyciągnięte są właściwe wnioski. W tej przedstawionej formie należy uznać rozprawę za wystarczająco zwięzłą. Wyniki w sposób bardzo jasny i przekonujący uzasadniają wyciągnięte na ich podstawie wnioski.

Nie zauważyłem istotnych uchybień redakcyjnych ani w rozszerzonym streszczeniu napisanym po angielsku, ani w załączonych artykułach. Dlatego uważam, że Autor wykazał umiejętność poprawnego przedstawienia wyników i rezultatów swojej pracy.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

W rozszerzonym streszczeniu przedstawiony został rozdział o właściwościach elektrycznych grafenu, w tym wyprowadzenie metodą ciasnego wiązania struktury elektronowej grafenu, zależności koncentracji elektronów i dziur od temperatury, wzory na czas relaksacji elektronów przy rozpraszaniu na domieszkach i fononach. Moim zdaniem ta część jest słabo napisana, ponieważ wiadomo, że właściwości elektronowych i transportowych grafenu nie możemy opisać przez proste wzory. Na przykład, domieszki i defekty mogą być absolutnie przezroczyste dla elektronów, rozpraszanie na punktowych defektach nie może być dobrze opisane w modelu rozdzielonych i

niezależnych elektronów i dziur, itd. Z innej strony, ta część praktycznie nie jest związana z samą rozprawą, i dlatego moim zdaniem lepiej by było ten rozdział opuścić, a zamiast tych wzorów skoncentrować się na szczegółowym opisie tych właściwości elektronowych i transportowych, które są naprawdę istotne dla przeprowadzenia zaplanowanych badań.

W streszczeniu przedstawiono to, co indywidualnie wykonane zostało przez Autora, ale oprócz tego dobrze byłoby określić, jaki wkład miał Autor w tych pracach, gdzie jest 7 albo 9 współautorów – są takie dwa artykuły.

Chciałbym jednak podkreślić, że te słabsze strony przedstawionej rozprawy nie rzutują jednak zasadniczo na moją wysoką jej ocenę.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

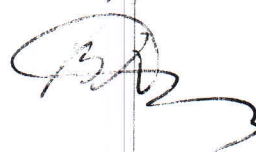
Przydatność rozprawy dla nauk technicznych można określić jako bardzo przydatna, ponieważ rozprawa jest skoncentrowana na wyjaśnienie możliwości zastosowania grafenu dla konstruowania nowych przyrządów półprzewodnikowych. Autorowi udało się udowodnić, że epitaksjalny grafen na podłożu SiC jest przydatny dla zastosowań komercyjnych. Można także twierdzić, że praca doktorska Pana mgr. T. Czuika wskazuje na kierunki dalszych badań, które mają na celu zastosowanie grafenu w takich naukach technicznych jak elektronika półprzewodnikowa i inżynieria materiałowa.

8. Do której kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

Rozprawę zaliczam do kategorii:

d) spełniająca z wyraźnym nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy

W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy mgr. Tymoteusza Ciuka pt. „Application of epitaxial graphene layers on silicon carbide in the technology of semiconductor devices” do publicznej obrony.



Prof. dr hab. Tadeusz PISARKIEWICZ
Katedra Elektroniki
Akademia Górniczo-Hutnicza
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków 25.01.2017

**KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

***Application of Epitaxial Graphene Layers on Silicon Carbide
in the Technology of Semiconductor Devices***

Autor rozprawy:

mgr inż. Tymoteusz Ciuk

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Nagroda Nobla z fizyki w 2010 r jaką uzyskali Andre Geim i Konstantin Novoselov za prace związane z badaniem dwuwymiarowego grafenu, stała się początkiem olbrzymiego wzrostu zainteresowania tym materiałem i jak podaje autor do chwili wydania rozprawy doktorskiej opublikowano ponad 57 tys. prac naukowych zawierających w tytule słowo „graphene”. Świadczy to z jednej strony o aktualności tematyki związanej z tym materiałem, ale jednocześnie wymaga od badacza umiejętnej analizy istniejącego stanu wiedzy i określenia perspektyw badawczych związanych z grafenem. Autor jasno sformułował tezy pracy, które mają ścisły związek z tematyką przedstawionych publikacji naukowych. Głównym celem pracy było eksperymentalne potwierdzenie postulowanego mechanizmu samoistnego domieszkowania quasi-swobodnej pojedynczej i podwójnej warstwy epitaksjalnego grafenu osadzanego metodą CVD na półizolacyjnych podłożach 4H-SiC(0001) i 6H-SiC(0001). W wyniku badań eksperymentalnych autor potwierdził też tezę, że w oparciu o tak otrzymany grafen można wytworzyć technikami stosowanymi w mikroelektronice czujnik pola magnetycznego w postaci hallotyonu o wysokiej czułości. Badania transportu elektrycznego w wytworzonych warstwach dobrze rokują również odnośnie innych elektronicznych zastosowań tego materiału.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Publikując wyniki swoich badań w liczących się czasopismach o zasięgu światowym, autor z konieczności musiał odnosić się do aktualnego stanu wiedzy na temat grafenu i w związku z powyższym takiej rzetelnej analizy źródeł dokonał bez trudu w swojej dysertacji. Już pobieżny przegląd literatury rzutuje na ważność podejmowanej tematyki, o czym świadczy m. in. ranga cytowanych czasopism. Przykładowo ilości odwołań do b. wysokiej rangi czasopism są następujące: *Physical Review B* - 21 odwołań, *Nature* i czasopisma z tej grupy – 10 odwołań, *Physical Review Letters* – 7 odwołań, *Applied Physics Letters* – 4 odwołania. Istnieje też dużo odwołań do czasopism zajmujących się tematyką struktur niskowymiarowych, takich jak *Nano Letters*, *Nanoscale*, *ACS Nano* lub też czasopism takich jak *Carbon*, poświęconych tematyce związków węgla. Brak jest analizy źródeł związanej z zastosowaniem przemysłowym tych materiałów, ale należy zdawać sobie sprawę, że na zastosowania grafenu jako konkurencyjnego materiału w elektronice należy jeszcze poczekać.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Przyjęty przez autora program badań w świetle sformułowanych założeń jest uzasadniony. Wytworzone zostały najpierw próbki grafenu na podłożach SiC technologią CVD opracowaną w IMTE W-wa. Następnie przeprowadzono prace eksperymentalne otrzymanych warstw i struktur i wyciągnięte zostały wnioski na podstawie przeprowadzonych badań.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Jednym z istotnych elementów rzutujących na jakość i użyteczność przeprowadzonych badań był dostęp do próbek o jakości elektronicznej. Z popularnością tematyki grafenowej nie idzie często w parze poziom technologii tych materiałów, co uniemożliwia ich praktyczne zastosowania. Technologia CVD stosowana w ITME umożliwia, jak wskazują m. in. badania autora, wytworzenie próbek półprzewodników o obiecujących parametrach transportu elektrycznego. Autor w szczególności badał koncentrację i ruchliwość nośników ładunku w quasiswobodnej pojedynczej i podwójnej warstwie grafenu oraz odniósł się do postulowanego mechanizmu indukowania ładunku w grafenie w wyniku wpływu spontanicznej polaryzacji heksagonalnych politypów materiału podłożowego SiC. Stosując odpowiednie konfiguracje pomiarowe autor dokonał również badań zjawiska anizotropii rezystancji powierzchniowej grafenu, co ma ścisły związek z typową dla SiC morfologią powierzchni tego materiału podłożowego z licznymi tarasami i uskokami.

Nie bez znaczenia jest też fakt opracowania przez autora rozprawy pełnego cyklu technologicznego grafenowego czujnika hallotronowego, wytworzenie takiego czujnika z wykorzystaniem technologii mikroelektronicznych oraz określenie jego parametrów z punktu widzenia przyszłych zastosowań. Przeprowadzenie tego typu badań i wytworzenie gotowego produktu, co jest zwieńczeniem dokonanych badań podstawowych, w pełni uzasadnia tytuł rozprawy doktorskiej.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Głównym elementem rozprawy jest prezentacja czterech artykułów opublikowanych w uznanych czasopismach, stąd oddzielna szczegółowa prezentacja osiągniętych wyników nie była konieczna. Autor opracował jednak niezależnie wprowadzenie do tematyki związanej z grafenem, składające się z zarysu historycznego rozwoju tej tematyki, krótkiego omówienia podstawowych właściwości grafenu oraz metod jego wytwarzania. W szczególności omówiony został efekt Halla w epitaksjalnym grafenie badany metodą van der Pauwa, wpływ podłoża 4H-SiC oraz 6H-SiC na koncentrację nośników ładunku w grafenie, scharakteryzowano indukowaną podłożem anizotropię rezystancji w grafenie. Przedstawiony został także zarys technologii hallotronu w oparciu o monowarstwę grafenową na podłożu 6H-SiC(0001) i scharakteryzowano krótko parametry tego czujnika pola magnetycznego. Ponadto każda załączona publikacja została opatrzona krótkim omówieniem. W podsumowaniu autor podał spis wszystkich publikacji i patentów, gdzie występuje jako współautor oraz podał spis swoich licznych prezentacji konferencyjnych, zarówno ustnych jak i plakatowych. Wymienił również liczne projekty badawcze związane z grafenem (3 międzynarodowe i 7 krajowych), gdzie występował jako współrealizator.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Rozprawa została zredagowana w języku angielskim i należy podkreślić jej bardzo dobrą jakość językową.

Błędów redakcyjnych jest niewiele. Przykładowo: brak oznaczeń (a) oraz (b) na rys.1 i błędne odwołanie do Fig.2a zamiast Fig.1a na str. 19, na str.22 odwołanie do Fig.3 zamiast Fig.2 (niezależnie Fig.2 jest tak mały, że jest słabo czytelny). Na str. 27 wiersz 4-ty od góry zamiast $en(\Delta\epsilon_F)$ powinno być $n(\Delta\epsilon_F)$, na str. 37 wzór (38) wymaga uzupełnienia a we wzorze (39) brak jest oznaczeń wektorów.

Błędów rzeczowych nie zauważono.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Przy pierwszym czytaniu, zwłaszcza wstępu teoretycznego zawartego w „Chapter 2 Fundamental principles” mogłoby się wydawać, że praca będzie miała charakter typowy dla nauk podstawowych. Jednak dalsza lektura pracy całkowicie utwierdza czytelnika w przekonaniu, że rozprawa jest istotnym wkładem w tematyce elektronicznych zastosowań grafenu. Potwierdzeniem tego są nie tylko prognozy wynikające z badań szczegółowych własności quasi-swobodnej warstwy grafenu ale także wytworzony finalny egzemplarz czujnika pola magnetycznego o interesujących parametrach. Uzasadnia to całkowicie przydatność rozprawy dla nauk technicznych.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Praca zdaniem recenzenta jest wybitnie dobra i zasługuje na wyróżnienie. Reasumując stwierdzam, że cel pracy został osiągnięty i recenzowana rozprawa doktorska **spełnia wymagania** wynikające z Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z 14 marca 2003 r oraz wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Tymoteusza Ciuka do publicznej obrony.

Kraków 25.01.2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Piłku', is written in a cursive style.