

Prof. dr hab. inż. Mariusz Zdrojek
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
tel. 22 234 71 70
mariusz.zdrojek@pw.edu.pl
www.fizyka.pw.edu.pl

Warszawa, 28.12.2021

Recenzja rozprawy doktorskiej Jakuba Kierdaszuka

Praca doktorska Jakuba Kierdaszuka zatytułowana „Badania procesów rozproszeniowych w grafenie na podłożu z nanodrutów” zrealizowana była na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr hab. Anety Drabińskiej, a promotorem pomocniczym jest dr Johannes Binder.

Manuskrypt pracy doktorskiej składa się przede wszystkim z dziesięciu głównych rozdziałów, z których pierwsze cztery to głównie część literaturowa (z niewielkimi wyjątkami), rozdział piąty to metodologia badawcza i opis przygotowania próbek, a pozostałe cztery dotyczą głównych wyników pracy doktoranta, kończąc na rozdziale 10, podsumowującym osiągnięcia badawcze. Manuskrypt zawiera również index najważniejszych skrótów oraz bardzo bogatą listę odnośników do literatury (w sumie 234). W strukturze manuskryptu brakuje mi rozdziału dotyczącego dorobku naukowego i informacji dotyczących publikacji naukowych, konferencji, prezentacji, udziału w projektach badawczych. Część z tych informacji można oczywiście odszukać w sieci. Między innymi, baza Scopus podaje, że p. Kierdaszuk jest współautorem 8 publikacji w recenzowanych periodykach naukowych, z czego wszystkie prace są mocno związane z tematyką rozprawy doktorskiej. Co istotne, w 7 z tych prac doktorant jest pierwszym autorem. Rezultaty pracy doktorskiej doktorant publikuje w takich czasopismach jak Carbon (IF:9.5), Applied Surface Science (IF:6.7), czy Physical Rev. B (IF:4.0), które należą w dyscyplinie nauki fizyczne do znaczących. Całkowita liczba cytowań wspomnianych prac wynosi 34 według bazy Web of Science, a jego index Hirsha wynosi 4, co jest wynikiem pokazującym, że młody badacz zaczyna być dostrzegany przez społeczność naukową z całego świata. Oczekuję, że w stosowanym czasie, doktorant przedstawi więcej informacji dotyczących swojej działalności naukowej.

Pierwszy rozdział manuskryptu to krótkie wprowadzenie do tematyki pracy doktorskiej, pokazujące kontekst i motywację podjętego tematu. Autor nakreśla tutaj również zakres przeprowadzonych badań, przemycając jednocześnie komentarze dotyczące otrzymanych wyników. Rozdział ten skutecznie zachęca do dalszej lektury.

Kolejny rozdział pracy przedstawia wybrane właściwości grafenu, a w szczególności jego strukturę krystaliczną i elektronową, oraz wynikające z nich zjawisko występowania pola pseudomagetycznego, będącego jednym z czynników wpływających na proces rozproszenia nośników ładunku. Autor kończy rozdział bardzo krótkim opisem zastosowań grafenu.

Rozdział trzeci dotyczy wybranych właściwości materiałów z grupy azotków, takich jak GaN, z domieszkowanymi warstwami. Materiał ten jest dalej w pracy traktowany jako podłoże dla grafenu. Autor przedstawia opis struktury krystalicznej i elektronowej azotków, podając ich podstawowe parametry i zależności. Dodatkowo autor zwraca uwagę na ważną cechę struktury krystalicznej GaN i AlGaN przejawiającą się poprzez

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
tel. +48 (22) 234 72 67
fax: +48 (22) 628 21 71
dziekan@if.pw.edu.pl
fizyka.pw.edu.pl

występowanie gradientu polaryzacji na interfejsach struktury, co wpływa na strukturę pasm energetycznych w heterostrukturach azotkowych. Rozdział zakończony jest przykładami zastosowań azotków, również tych w formie nanodrutów.

W następnym rozdziale autor skupia się na opisie heterostruktur typu grafen/GaN i ich podstawowych właściwości. Przede wszystkim analizowana jest struktura pasmowa złącza grafen/GaN (dla GaN domieszkowanego na typ p) i charakterystyka działania złącza w kontekście zmian w strukturze elektronowej. Następnie analizie (w ujęciu topograficznym) poddana jest struktura grafenu na nanodrutach GaN i tutaj podkreślam, że autor przekazuje w tej kwestii głównie swoje doniesienia literaturowe. Autor, pokazuje jak ułożenie grafenu na nanodrutach o różnej gęstości rozmieszczenia oraz różnej i podobnej wysokości wpływają na wartości naprężenia grafenu. Co więcej, autor zwraca uwagę na ciekawe obserwacje dotyczące zmian i modulacji koncentracji ładunków w grafenie w odniesieniu do zmian parametrów strukturalnych podłoża. Dalej, autor pokazuje ciekawe refleksje dotyczące wpływu morfologii podłoża na efekt wzmocnienia intensywności widm rozpraszania ramanowskiego grafenu, będący konsekwencją oddziaływań z ładunkami zgromadzonymi na końcach nanodrutów (analogia zjawiska SERS). Rozdział kończy się porcją informacji literaturowych dotyczących potencjalnych zastosowań heterostruktur grafen/GaN.

Rozdział piąty zawiera opis metodologii badań czyli metody wytwarzania materiałów i próbek oraz dobór odpowiednich metod charakteryzacji próbek. Autor bardzo skrupulatnie opisuje gdzie i w jaki sposób badane w pracy materiały i próbki były wytworzone oraz wyjaśnia kto mu pomagał zarówno od strony technologicznej jak i eksperymentalnej przy realizacji pracy. Pokazuje to szeroki zakres współpracy jaką autor podjął w trakcie realizacji swojej pracy doktorskiej.

Autor po kolei opisuje metody wytwarzania nanodrutów i podłoży GaN, złotych nanodrutów i grafenu oraz metodykę przenoszenia warstw grafenowych z miedzi na zadane podłoża. Następnie autor skupia się na opisie technik eksperymentalnych dobranych tak aby mogły wnieść nowe informacje do podjętego przez doktoranta tematu badań. Techniki badawcze opisane przez autora to (chronologicznie): skaningowa mikroskopia elektronowa, dyfrakcja rentgenowska, elektroodbicie, mikroskopia sił atomowych, skaningowa mikroskopia tunelowa, bezkontaktowe pomiary transportowe, pomiary prądowo-napięciowe i pojemnościowo-napięciowe. Techniki te opisane są w sposób bardzo dydaktyczny, pokazujący znajomość technik przez autora oraz w sposób wystarczający do zrozumienia i interpretacji wyników uzyskanych za ich pomocą. Spektroskopia ramanowska jako jedna z ważniejszych metod badawczych wykorzystanych w pracy potraktowana jest oddzielnie i z większą szczegółowością. Doktorant przedstawia kluczowe informacje dotyczące zjawiska Ramana i pokazuje typowe widmo ramanowskie grafenu, wyjaśniając jakie mechanizmy kreacji kryją się za poszczególnymi głównymi modami G, D, 2D i D'. Dodatkowo wyjaśnione są efekty związane ze zmianą energii fononów w grafenie pod wpływem energii pobudzenia oraz w zależności od jego naprężenia. Autor omawia również wpływ swobodnych nośników oraz defektów na widmo ramanowskie grafenu. W kontekście wielowarstw grafenowych poruszony jest również efekt zmiany kształtu modów ramanowskich w zależności od wzajemnej orientacji warstw. Rozdział ten kończy się krótkim opisem parametrów technicznych przyjętych podczas badań ramanowskich (modele spektrometrów, długości fali, parametry mapowania, rozdzielczość, moc lasera). Autor podaje, że pomiary były wykonywane dla mocy lasera o wartości kilku mW – kilku mW czyli ile dokładnie? Przy jakiej wartości gęstości mocy lasera występuje efekt grzania próbki grafenowej?

W podsumowaniu rozdziału autor przedstawia listę próbek i technik eksperymentalnych wykorzystanych do ich zbadania.



ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
tel. +48 (22) 234 72 67
fax: +48 (22) 628 21 71
dziekan@if.pw.edu.pl
fizyka.pw.edu.pl

W rozdziale szóstym autor prezentuje wyniki badań wpływu podłoża nanodrutów na intensywność modów Ramanowskich grafenu (mono- i dwuwarstwy) i wysuwa kilka ciekawych wniosków. Po pierwsze zauważa, iż intensywności widm monowarstwy są większe niż w przypadku dwuwarstwy, i nie zależą od struktury końcówek drutów GaN/AlGaIn. W drodze eksperymentu autor wykluczył, że efekt naprężenia, redukcja ekranowania, fluktuacje koncentracji, zjawisko interferencji, mogą być uważane za potencjalne źródła efektu wzmocnienia widm ramanowskich grafenu. Co ciekawe jeszcze większe wzmocnienie widm Ramana w grafenie występuje na złotych nanosłupkach, i dodatkowo obserwowane są przesunięcia pozycji pików. Autor postuluje, że za efekt wzmocnienia widm w grafenie na złotych słupkach może odpowiadać elektromagnetyczny efekt SERS, i jednocześnie wyklucza ten mechanizm jako wiodący w przypadku grafenu na czystych nanodrutach GaN. W tym drugim przypadku, autor uważa, że jednym z prawdopodobnych czynników odpowiedzialnym za wzmocnienie widm Ramana może być chemiczny mechanizm SERS i związany z nim transfer ładunku między nanodrutami i grafenem. W podsumowaniu autor stwierdza, że badany efekt mógłby być wykorzystany do konstrukcji nowego typu czujników na grafenie. Co dokładnie autor miał na myśli?

Rozdział siódmy dotyczy badań, w których autor udowadnia w jaki sposób morfologia podłoża wpływa na rozkład naprężeń oraz koncentrację nośników w przypadku dwuwarstwy grafenowej zawieszonej na nanodrutach i słupkach GaN. Pomiary AFM i SEM uwiadamiają korelacje między średnicą i rozstawieniem podpierających drutów a rozkładem naprężenia grafenu. Pomiar STS (dla dwuwarstwy grafenu na nanodrutach GaN) wykazał zmiany w lokalnej gęstości stanów w pobliżu zmarszczki grafenu, co może być skutkiem zmiany naprężenia grafenu. Dalej autor prezentuje wyniki badań ramanowskich dla dwuwarstwy grafenu, gdzie, co ciekawe, zauważa efekt wzmocnienia widm grafenu również na nanodrutach o różnej wysokości. Autor postuluje, że może być to związane z ich morfologią, na co wskazują uzyskane korelacje parametrów pików ramanowskich i są zgodne z wnioskami z pomiarów AFM. Dodatkowo autor prezentuje analizę wzmocnienia intensywności modu D' , czego powodem może być efekt oddziaływania nośników z polem pseudomagnetycznym.

Doktorant nakreśla również ciekawą perspektywę dalszych badań dotyczących mapowania ramanowskiego z wykorzystaniem pola elektrycznego, które z całą pewnością przyniosłyby bardzo interesujące wyniki w przypadku rozważanych próbek (ale również i wielu innych).

Motyacją jaką kierowała doktoranta w badaniach przedstawionych w rozdziale 8 było zweryfikowanie czy w wyniku oddziaływania z polem pseudomagnetycznym drogi rozproszeń ulegną zmianie. Za pomocą technik bezkontaktowych wykonano pomiary transportowe w grafenie na różnych podłożach (typ i morfologia): nanodrutu GaN z końcówkami AlGaIn oraz nanodrutu i słupki GaN. Autor zbadał wpływ zmiany składu końcówki i indukowanego w nim pola elektrycznego na transport ładunków w grafenie (również w zależności od liczby warstw). Zbadano również czy zmianę długości dróg rozproszeń pomiędzy próbkami można powiązać z gradientem naprężenia i z indukcją pól pseudomagnetycznych. Bazując na uzyskanych wynikach, autor sugeruje, że czynnikami wpływającymi na długość dróg rozproszeń mogą być właśnie oddziaływania z polami pseudomagnetycznymi. Prezentowane w tym rozdziale wyniki i wnioski uzupełniają te przedstawione wcześniej (rozdziały 6 i 7).

Rozdział dziewiąty dotyczy pomiarów próbek bramkowanego grafenu (cztery warstwy) na podłożu epitaksjalnego GaN oraz nanodrutów o różnej gęstości rozstawienia. Autor



ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
tel. +48 (22) 234 72 67
fax: +48 (22) 628 21 71
dziekan@if.pw.edu.pl
fizyka.pw.edu.pl

pokazał mechanizm działania złącza grafen/GaN oraz to jak morfologia podłoża wpływa na właściwości wielowarstwowego grafenu (korelacje pomiarów C-V i I-V, elektroodbitcie, KPFM i pomiary ramanowskie). Pokazano wpływ na zmianę koncentracji nośników oraz elektrostatycznie indukowanego naprężenia grafenu. Ciekawym rezultatem pokazanym przez autora jest wysoką efektywność bramkowania grafenu na epitaksjalnym GaN, oraz dużo mniejszą efektywność bramkowania dla grafenu zawieszonego na nanosłupkach GaN, która może być modyfikowana poprzez użycie słupków o innej średnicy.

Główna część manuskryptu kończy się krótkim rozdziałem (10) pokrótce podsumowującym najważniejsze osiągnięcia pracy doktoranta, które sformułowane są w sposób przekonujący i przedstawione bardzo klarownie.

W ogólności chciałem zwrócić szczególną uwagę na to, że manuskrypt napisany jest w sposób absolutnie fenomenalny, z użyciem nienagannego języka polskiego i stylu. Sprawia to, że czytanie manuskryptu jest prawdziwą przyjemnością. Poprzez to w jaki sposób jest napisany, manuskrypt poza wartością naukową jaką ze sobą niesie, posiada również ogromną wartość dydaktyczną m.in. dla młodszych studentów czy doktorantów lub badaczy z poza dziedziny. Nie doszukałem się w tekście błędów a szata graficzna i prezentowane w pracy wyniki są bardzo czytelne i zrozumiałe. Odnalazłem jedynie jedno nieprawidłowe odniesienie do rysunku (str. 146).

W uwagach końcowych chciałbym pokreślić, że praca doktorska Jakuba Kierdaszuka dotyczy niezwykle ciekawych i ostatnio bardzo intensywnie prowadzonych badań właściwości m.in. strukturalnych i elektronowych materiałów hybrydowych o strukturze dwuwymiarowej. Uważam, że zawarte w pracy wyniki badań właściwości zawieszonego na nanodrutach grafenu są bardzo kompleksowe, i z pewnością przyczynią się do szerszego zrozumienia ciekawych właściwości tego typu struktur. Co więcej, zaprezentowane wyniki uzupełniają aktualnie dostępną na ten temat wiedzę oraz wnoszą do niej nowe istotne informacje i mogą być inspiracją dla innych badaczy. Istotną wagę wyników pracy doktorant podkreśla również fakt, że w dużej części są one opublikowane w kilku prestiżowych periodykach naukowych (już cytowanych).

Za główne i wyróżniające osiągnięcie doktoranta uważam określenie wpływu podłoża częściowo zawieszonego grafenu na efekt wzmocnienia widm Ramana, zmianę rozkładu naprężeń i transportu ładunku, oraz ich wzajemne korelacje. Uważam, że całość rozprawy przedstawiona w manuskrypcie zasługuje na wyróżnienie.

W związku z powyższym, uważam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa może być podstawą uzyskania stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne ponieważ stanowi oryginalne rozwiązanie przez autora problemu naukowego i spełnia warunki określone w stosownej ustawie.

Niniejszym, wnoszę o dopuszczenie mgra Jakuba Kierdaszuka do kolejnych etapów procedury przewodu doktorskiego. Równocześnie, wraz z podanymi powyżej argumentami wnoszę o wyróżnienie jego rozprawy doktorskiej.


Mariusz Zdrojek

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
tel. +48 (22) 234 72 67
fax: +48 (22) 628 21 71
dziekan@if.pw.edu.pl
fizyka.pw.edu.pl