



UNIwersytet  
Warszawski

Warszawa, 23.05.2019 r.

prof. dr hab. Andrzej Wysmołek,  
Zakład Fizyki Ciała Stałego  
Instytut Fizyki Doświadczalnej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Olega Petruka  
pt. „Metoda kompensacji niezrównoważenia hallotronów cienkowarstwowych tomografii  
rezystancyjnej”**

Uzyskanie grafenu z wykorzystaniem eksfoliacji mechanicznej wywołało ogromne zainteresowanie społeczności naukowej na całym świecie i zapoczątkowało okres intensywnych badań podstawowych tego materiału. Dzięki swoim właściwościom, takim jak świetne przewodnictwo elektryczne i termiczne, duża ruchliwość nośników ładunku, wytrzymałość mechaniczna, materiał ten jest ciągle obiecujący dla różnorodnych zastosowań. Grafen otworzył też nowy obszar badań związany z atomowo cienkimi materiałami warstwowymi (materiałami 2D), do których należą metale, półprzewodniki, izolatory a nawet nadprzewodniki. Ta nowa klasa materiałów, oprócz interesującej tematyki badań podstawowych, daje nadzieję na zupełnie nowe aplikacje. Przykładem nowatorskich zastosowań materiałów warstwowych są między innymi czujniki pola magnetycznego (hallotrony), którymi zajął się w swojej rozprawie mgr inż. Oleg Petruk. Postawił on sobie za cel rozwiązanie bardzo ważnego problemu, związanego z kompensacją sygnału niezrównoważenia cienkowarstwowych sensorów.

Zadanie to mgr inż. Oleg Petruk podzielił na kilka części. W pierwszym kroku rozważył różne modyfikacje geometryczne czujników cienkowarstwowych w kształcie krzyża pod kątem maksymalizacji czułości i minimalizacji napięć niezrównoważenia. Weryfikację doświadczalną rozważań teoretycznych oraz modelowania przeprowadził na przykładzie hallotronów grafenowych, których zaletą jest duża czułość na pole magnetyczne. Niejednorodności struktur grafenowych (o różnym pochodzeniu) powodują jednak, że są one narażone na występowanie dużych napięć niezrównoważenia. Czujniki grafenowe stanowią więc bardzo dobry obiekt to weryfikacji różnych metod kompensacji sygnału niezrównoważenia, przy zachowaniu wysokiej czułości.

W następnych etapach realizacji zadania mgr inż. Oleg Petruk opracował model hallotronu cienkowarstwowego w kształcie krzyża, który pozwolił mu na efektywne zastosowanie tomografii rezystancyjnej. Jest to bardzo nowatorska (w skali światowej) część pracy. Zbudowanie sterowanego komputerowo tomografu rezystancyjnego umożliwiło automatyzację pomiarów tomograficznych czujników hallowskich. Przeprowadzone modelowanie oraz analiza wyników badań tomograficznych, uzyskanych dzięki opracowanemu przez mgr. inż. Olega Petruka algorytmowi, umożliwiła zaproponowanie metody kompensacji napięcia niezrównoważenia wykorzystującej kombinację połączeń elektrod grzebieniowych dla sensora w kształcie krzyża.

Oddzielnym sposobem kompensacji napięcia niezrównoważenia, zaproponowanym w rozprawie, było wykorzystanie tomografii rezystancyjnej do znalezienia obszarów korekcyjnych struktury, z których usunięcie materiału (np. za pomocą lasera) minimalizuje napięcie niezrównoważenia. Obie te metody są obiecujące i dają możliwość zastosowania automatycznej korekcji parametrów czujników cienkowarstwowch w procesie produkcji, co w mojej opinii zostało wykazane przez mgr. inż. Olega Petruka w rozprawie doktorskiej.

Przejdę teraz do szczegółowego omówienia rozprawy. Rozprawa została w sposób klarowny podzielona na 15 rozdziałów i liczy 103 strony wraz z bibliografią. Po zwięzłym wprowadzeniu w tematykę i przedstawieniu celu oraz zakresu pracy, w rozdziale 3 dokonano przeglądu stanu wiedzy o różnych typach hallotronów. W szczególności przedstawiono zasadę działania hallotronów, zdefiniowano ich najważniejsze parametry użytkowe, takie jak czułość hallotronu, rezystancja wejściowa i wyjściowa, liniowość charakterystyki, parametry szumowe, zależności temperaturowe sygnału. Omówiono również podstawowe układy geometryczne (kształty) czujników hallowskich, technologie wytwarzania hallotronów oraz różne ich konstrukcje. To wprowadzenie, chociaż niezbyt rozbudowane, wydaje się w wystraszającym z punktu widzenia problemów podejmowanych w rozprawie. Najważniejszym elementem rozdziału 3 jest podrozdział 3.5, w którym omówiono typowe źródła niezrównoważenia sygnału wyjściowego hallotronów, a wśród nich te wynikające z asymetrii rozkładu rezystancji oraz występowania sił termoelektrycznych. Zaprezentowano również trzy podstawowe metody kompensacji sygnału niezrównoważenia wykorzystujące kompensację z użyciem dodatkowych rezystorów, mechanicznej korekty struktury, odpowiednich układów połączeń większej liczby struktur hallowskich oraz zmiany sposobu zasilania struktur (np. poprzez cykliczne zmiany kierunku przepływu prądu oraz elektrod zasilających i pomiarowych). Na końcu rozdziału wspomniane zostały układy kompensacji w postaci niezależnego lub też zintegrowanego z hallotroном układu elektronicznego oraz scalone przetworniki hallotronowe, posiadające kompensację źródła zasilania, dynamiczną kompensację napięcia niezrównoważenia, kompensację temperaturową, układy filtrujące oraz układy korygujące nieliniowości charakterystyki.

Jak już wspominałem rozdział 3 jest dobrym wprowadzeniem do ważnych z punktu widzenia rozprawy problemów. Pewien niewielki niedosyt może budzić czasami lakoniczne omówienie przyczyn fizycznych problemów, jak np. w przypadku stwierdzenia (str. 34), że „*napięcie termoelektryczne  $U_T$  niezrównoważenia osiąga znaczne wartości w przypadku niepoprawnego wykonania elektrod hallotronu*”. To bardzo ogólne stwierdzenie i pewnie byłoby dobrze dla czytelnika żeby lepiej wyjaśnić o jakie niepoprawne wykonanie elektrod może chodzić?

Rozdział 4 omawia podstawowe właściwości grafenu i struktur grafenowych w kontekście ich zastosowania w hallotronach. Jak już wspomniano, oprócz dużej czułości

hallotrony grafenowe mogą pracować w szerokim zakresie temperatur, począwszy od temperatur bliskich zeru bezwzględnemu do ponad 400 K. Niestety parametry czujników grafenowych silnie zależą od słabo kontrolowanych czynników związanych np. z technologią wytwarzania i strukturyzacji, przeniesieniem grafenu na docelowe podłoże, jak również od oddziaływania z zastosowanym podłożem. Największe czułości, przy najniższym szumie zademonstrowano dla czujników wykonanych z wykorzystaniem eksfoliacji mechanicznej z niewielkich kryształów grafitu o wysokiej jakości, odłożonych na podłoża z heksagonalnego azotku boru. Takie rozwiązanie trudno jest jednak zastosować w skali przemysłowej. Do tego celu konieczne jest wykorzystanie technologii dających rozsądnie duże powierzchnie grafenu (czy też układu warstw grafenowych) o dużej ruchliwości nośników oraz wysokiej jednorodności. Ważna jest również stabilność parametrów struktur grafenowych w czasie. Zgadzam się z mgr. inż. Olegiem Petrukiem, że biorąc to pod uwagę różne technologie, pod wieloma względami atrakcyjne jest wykorzystanie struktur grafenowych hodowanych na węglu krzemu, uzyskiwanych w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, zarówno w procesie dekompozycji SiC w wysokiej temperaturze, jak też epitaksji z fazy gazowej (VPE). Biorąc pod uwagę parametry przedstawione w tabeli 4.1 zastanawiające jest dlaczego parametry czujników wytworzonych z wykorzystaniem epitaksji na SiC są gorsze niż dla grafenu sublimowanego?

Rozdział 5 poświęcony jest omówieniu metody tomografii rezystancyjnej. Na wstępie umiejscowiono tomografię rezystancyjną pośród innych metod tomograficznych. W sposób przystępny przedstawiono istotę pomiarów tomograficznych, w szczególności tomografii rezystancyjnej, która polega na uzyskiwaniu informacji o przestrzennym rozkładzie rezystywności (oporności właściwej) materiału na podstawie pomiarów wykonanych przy użyciu elektrod umieszczonych na brzegu badanego obszaru materiału. Metoda ta jest coraz bardziej popularna w badaniach materiałowych, w szczególności zaś grafenu epitaksjalnego. W dalszej części rozdziału 5 przedstawione są podstawy teoretyczne modelowania rozkładu rezystywności hallotronów cienkowarstwowych. Po przedyskutowaniu różnych możliwości, do modelowania struktur hallotronowych wybrano metodę elementów skończonych, z wykorzystaniem otwartego oprogramowania, co w mojej opinii jest właściwym wyborem, przynajmniej na tym etapie prac. Następnie zaproponowano rozwiązanie wykorzystujące tomografię rezystancyjną do kompensacji napięcia niezrównoważenia, które opiera się na wykorzystaniu systemu elektrod grzebieniowych, umieszczonych na brzegach struktury hallotronowej. Pomiarów elektrycznych pomiędzy poszczególnymi elektrodami zostały zrealizowane z wykorzystaniem sterowanego cyfrowo stanowiska pomiarowego. Jako przedmiot badań wybrano hallotrony grafenowe, wytwarzane w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, w ramach projektu Graf-Tech/NCBR/12/14/2013. Jak to przedstawiono w rozdziale 7, hallotrony te charakteryzują się wysoką czułością, jednak wykazują duże wartości napięcia niezrównoważenia, co znacznie ogranicza ich ew. zastosowania przemysłowe. Są więc bardzo dobrymi kandydatami do przetestowania efektywności metod kompensacji napięcia niezrównoważenia zaproponowanych przez mgr. inż. Olega Petruka.

Rozdział 8 został poświęcony zagadnieniom optymalizacji geometrii hallotronów z punktu widzenia właściwości czujnika hallowskiego, w tym zmniejszenia wpływu lokalnego nagrzewania się struktury oraz odpowiedniego ukształtowania rozkładu gęstości prądu. Miało to na celu zminimalizowanie efektów termoelektrycznych oraz degradacji struktury, wywołanych nadmiernym lokalnym ogrzewaniem. Przeanalizowano szereg struktur, z których

jako najlepszą wybrano strukturę o geometrii krzyża równoramiennego z zaokrągleniem o promieniu równym szerokości krawędzi ramion. Podstawą takiego wyboru był kompromis pomiędzy czułością, a jednorodnością rozptywu prądu w strukturze sensora. Uzyskane wyniki są przekonujące. Być może w przyszłości warto byłoby się pokusić o sprawdzenie uzyskanych wyników np. z wykorzystaniem kamery termowizyjnej? Może warto też było przedstawić jak parametry czujnika ewoluują z czasem? Ciekaw jestem opinii mgr. inż. Olega Petruka w tej sprawie.

Rozdział 9. stanowi bardzo wartościową część pracy, w której przedstawiono skonstruowane przez mgr. inż. Olega Petruka stanowisko pomiarowe tomografu rezystancyjnego. Umożliwia ono badanie w trybie automatycznym struktur hallotronowych z wyprowadzeniami grzebieniowymi. W celu modelowania nieciągłości w hallotronie wykorzystano pięć fantomów numerycznych, które pozwoliły na weryfikację efektywności algorytmu generacji wady równoważnej. Wydaje mi się, że wartościowe byłoby zaprezentowanie wyników doświadczalnych pokazujących jaka jest rzeczywista efektywność zmniejszenia napięcia niezrównoważenia po wytworzeniu odpowiednich obszarów korekcyjnych dla struktur grafenowych?

W rozdziale 10. przedstawiono drugą metodę kompensacji sygnału niezrównoważenia, dla sensora z elektrodami grzebieniowymi, która nie wymaga korekty struktury sensora. Metoda opiera się na takim doborze połączeń elektrod grzebieniowych, przy którym napięcie niezrównoważenia jest najmniejsze. Efektywność tej metody zweryfikowano doświadczalnie dla siedmiu grafenowych struktur hallotronowych wykonanych w ITME na podłożu z węgla krzemu. Uzyskane wyniki są bardzo obiecujące – dla czterech z badanych czujników redukcja napięcia niezrównoważenia wyniosła 90% i więcej. Warto podkreślić jest to, że przeprowadzona kompensacja jest równie efektywna dla pracy w podwyższonej temperaturze. Z ciekawości zapytałbym, czy badano jak zachowują się czujniki w obniżonej temperaturze? Dwa z badanych czujników wykazały redukcję na poziomie 60-70%. Pytanie czy w tym przypadku można uzyskać lepsze efekty, dokonując najpierw korekcji kształtu? Czy takie postępowanie jest uzasadnione w przypadku produkcji przemysłowej?

Wyniki uzyskane przez mgr. inż. Olega Petruka dały mu podstawę do zaproponowania wytycznych do zastosowania metod kompensacji napięcia niezrównoważenia w warunkach przemysłowych oraz podania ograniczeń opracowanych rozwiązań. O wartości uzyskanych wyników świadczy zastosowanie opracowanej metody kompensacji napięcia niezrównoważenia w hallotronie stanowiącym element przekładnika prądowego firmy Lumel GTC1-100P0. Jest to potwierdzenie praktycznej przydatności rozwiązań opracowanych przed mgr. inż. Olega Petruka.

W mojej opinii przedstawiona do recenzji rozprawa świadczy o dużej wiedzy i umiejętnościach mgr. inż. Olega Petruka zarówno posługiwaniu się metodami numerycznymi, budowaniu złożonych układów kontrolno-pomiarowych oraz ich wykorzystania do rozwiązań znajdujących zastosowanie w warunkach przemysłowych. Zaprezentował on innowacyjne w skali światowej rozwiązania, które mają realne znaczenie dla produkcji hallotronów z wykorzystaniem grafenu. Rozwiązania te można przenieść na inne materiały 2D. Mgr. inż. Oleg Petruk wykazał się znajomością literatury przedmiotu, o czym świadczy bogata bibliografia składająca się z 147 pozycji. Za pewne uchybienie uznaję odsyłanie czytelnika do stron internetowych, np. poz. 118, gdzie znajdujemy adres strony internetowej <http://geospectrum.pl>, która nie podaje źródeł wykorzystanych informacji. W takiej sytuacji trudno je zweryfikować. Nie jest to jednak znaczące uchybienie, a raczej znak czasu.

Warto podkreślić, że pracę czyta się dobrze i jest ona napisana poprawnie po polsku. Jedyne uchybienie jakie znalazłem to pisownia słowa „ohm” zamiast „om” w odniesieniu do jednostki oporu elektrycznego (rezystancji).

Na zakończenie, chciałbym jeszcze raz podkreślić, że przedstawiona do recenzji praca prezentuje nowe wyniki, które dostarczają informacji o możliwościach kompensacji sygnału niezrównoważenia w warunkach przemysłowych. Mgr inż. Oleg Petruk udowodnił, że jest już doświadczonym młodym badaczem. Jest współautorem 18 artykułów – 7 w czasopismach posiadających współczynnik wpływu (impact factor), w tym jeden artykuł w Applied Phys. Letters, jeden artykuł w IEEE Transactions on magnetics, 5 w Acta. Phys. Polon. oraz 11 artykułów opublikowanych w książkach z materiałami konferencyjnymi. Jego współczynnik h wynosi 3 – to dobry wynik na tym etapie kariery naukowej. Najważniejsze elementy pracy zostały opublikowane Acta. Phys. Polon. w artykule pod tytułem „Novel method of offset voltage minimization”, którego mgr inż. Oleg Petruk jest pierwszym autorem.

W mojej opinii praca jest wyróżniająca i z nadmiarem spełnia ustawowe wymagania dotyczące uzyskania stopnia doktora. Wniosuję o dopuszczenie mgr. inż. Olega Petruka do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz wyróżnienie jego rozprawy.



