



UNIwersyTET ŁÓDZKI
Katedra Fizyki Ciała Stałego

90-236 Łódź, ul. Pomorska 149/153, tel. 48 (0)42 635-56-87, fax 48 (0)42 665 51 37

dr hab.inż. Krzysztof Warda

Łódź, 7 wrzesień 2015 r.

Katedra Fizyki Ciała Stałego

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Uniwersytet Łódzki

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Artura Działo pt. „Przewodnictwo elektryczne nanostruktur metalicznych”

Praca doktorska mgr. Artura Działo powstała na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, jednej z wiodących uczelni w kraju pod opieką promotora, dr. hab. prof. AGH Antoniego Paji. Praca liczy 74 strony i obejmuje wstęp, 5 rozdziałów merytorycznych, podsumowanie, dodatek matematyczny i spis literatury. Cytowana literatura zawiera 52 najbardziej istotne pozycje i jest moim zdaniem wystarczająco kompletna. Należy podkreślić iż autor jest współautorem 3 opublikowanych prac (2 prace w Acta Physica Polonica A gdzie jest drugim autorem oraz 1 praca w Proceedings of the ISD Workshops gdzie jest pierwszym autorem). Ponadto Autor uczestniczył w międzynarodowych konferencjach, szkołach i warsztatach tematycznych (łączna liczba obejmuje 7 pozycji na podstawie spisu dostarczonego przez autora rozprawy). Już we wstępie autor precyzuje cel pracy. Celem tym jest opis teoretyczny procesów dotyczących transportu elektronów w układach metalicznych silnie ograniczonych wymiarowo.

Rozdział pierwszy to wprowadzenie do opisu modelu przewodnictwa w cienkich warstwach metalicznych ze szczególnym uwzględnieniem własności charakteryzujących cienką warstwę; rozwiązanie równań Schrödingera dla

cienkiej warstwy czy opis podstawowych wielkości fizycznych takich jak energia Fermiego czy liczba i gęstość stanów elektronowych dla cienkiej warstwy metalu.

Rozdział drugi zawiera krótkie i zwięzłe omówienie własności transportowych metali ze szczególnym uwzględnieniem opisu transportu w modelu elektronów swobodnych za pomocą równania Boltzmann'a. Omawia zwięzłe przybliżenie

czasu relaksacji oraz wyrażenie na przewodnictwo dla modelu elektronów swobodnych.

Rozdział trzeci zawiera opis dynamiki drgań termicznych idealnej sieci krystalicznej. Autor omawia przybliżenie adiabatyczne oraz model Debye'a drgań sieci. Rozdziały 4 i 5 to najbardziej istotna i wartościowa część pracy która zawiera istotny wkład doktoranta.

Rozdział czwarty zawiera opis, dwuwymiarowego modelu 2D cienkiej warstwy metalu w którym otrzymano zależność oporu od temperatury (wzór 4.39). Bardziej realistyczny opis uzyskano dla modelu, w którym warstwa posiada określoną grubość L_z . Otrzymano wzór na opór cienkiej warstwy opisany wyrażeniem 4.71. Obliczona na podstawie powyższego wzoru oporność wykazuje oscylacyjny charakter związany ze zmieniającą się gęstością stanów na poziomie Fermiego wraz ze zmianą grubości warstwy.

W rozdziale piątym przedstawiono opis procesu rozpraszania elektronu na domieszkach w trzech wymiarach. Do obliczenia oporu wynikającego z rozpraszania na domieszkach autor rozprawy posłużył się równaniem Lippmanna-Schwinger'a oraz metodą funkcji Greena, aby znaleźć amplitudę rozpraszania. Opór elektryczny w płaszczyźnie warstwy znaleziono wykorzystując równanie Boltzmann'a. Autor zaproponował inne podejście niż autorzy wcześniej cytowanych prac wspomnianych w czwartym rozdziale i założył stałą koncentrację elektronów, a zmieniającą się z grubością poziom

Fermiego. Wynikiem tego jest odmienny rezultat. Opór wynikający z rozpraszania na atomach domieszek maleje wraz z grubością warstwy i ma oscylacyjny charakter dla grubości rzędu kilku monowarstw.

Po rozdziale piątym następuje dość oszczędne, jednostronicowe podsumowanie całej pracy. Jak widać z powyższego krótkiego przeglądu, Autor otrzymał kilka wartościowych i oryginalnych wyników dotyczących zjawisk transportu w układach cienkich warstw metalicznych.

Przede wszystkim, rozwinięty został warsztat badawczy, który pozwala na dalsze zastosowania i rozwój przewodnictwa w cienkich warstwach czy układach nanowymiarowych.

Najbardziej bezpośrednim rozszerzeniem byłoby, według mnie, zbadanie wpływu powierzchni, która odgrywa istotną rolę w przypadku oporu bardzo cienkich warstw. W przypadku układów silnie ograniczonych wymiarowo (bardzo cienkie warstwy) atomy powierzchniowe stanowią bardzo znaczną część wszystkich atomów w próbce w związku z tym należy się spodziewać, iż atomy powierzchniowe a co za tym idzie powierzchnia i jej stan odgrywają bardzo istotną rolę w pomiarach oporności co zresztą potwierdzają prace eksperymentalne o których autor wspomina.

Można żałować, że taki rozdział w którym uwzględniono warstwę powierzchniową nie znalazł się w tej pracy. Piszę to aczkolwiek mam świadomość trudności i złożoności obliczeniowych. Na podstawie lektury pracy widać, że Autor zadbał o solidność warsztatową i przejawiał dużą samodzielność w rozwiązywaniu problemów, zarówno w zakresie implementacji teorii jak i samych obliczeń. Tę samodzielność widać także przy opracowaniu materiału i redakcji tekstu. Pracę czyta się dobrze, jest napisana poprawnym językiem fizycznym.

Moim zdaniem, naukową wartość pracy, oceniam wysoko. W szczególności, na podkreślenie zasługuje dbałość o elegancję matematyczną opisu modeli (niektóre szczegóły formalizmu są podane w Dodatkach), oraz biegłość Autora w obliczeniach numerycznych.

Wyraża się ona również w tworzeniu kodów własnych programów. Autor nie wspomniał co prawda w jakim środowisku wykonywał obliczenia tzn. czy jest to pakiet Mathematica, Fortran czy C/C++.

Autor wykazuje krytycyzm naukowy i starannie sprawdza każdy krok swego postępowania. Pracą tą udowodnił, że jest dojrzałym badaczem, który przykłada wagę do wyboru właściwej metody i do uzyskania wiarygodnych wyników.

Reasumując, uważam że przedstawiona mi do oceny praca spełnia wszelkie formalne i zwyczajowe wymagania w zakresie prac doktorskich z fizyki i wnoszę o dopuszczenie mgr. Artura Działa do jej publicznej obrony.

Krzysztof Warda

