



Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk

Mariana Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań
tel. 61 8695 112, 234, fax 61 8684-524



Poznań, 18 stycznia 2021 r.

dr hab. Andrzej Łapiński, prof. IFM PAN
e-mail: lapinski@ifmpan.poznan.pl

DF-63/4/2021

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Dychalskiej pt.: "Badanie właściwości strukturalnych i powierzchniowych cienkich warstw diamentowych metodami spektroskopowymi"

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana przez mgr inż. Annę Dychalską w Instytucie Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej w Poznaniu pod opieką naukową dra hab. Mirosława Szybowicza, prof. PP. Praca dotyczy eksperymentalnych badań właściwości fizykochemicznych cienkich warstw diamentowych.

Rozprawa doktorska ma formę opracowania liczącego 144 strony. Rozpoczyna się spisem treści, streszczeniem w języku polskim i angielskim, spisem symboli (skrótów) oraz wstępem. Dalej następuje zasadnicza część, która została podzielona na pięć rozdziałów. Rozprawa kończy się spisem literatury, liczącym 145 pozycji, spisem ilustracji i tabel oraz opisem dorobku naukowego Pani mgr inż. Anny Dychalskiej.

We wstępie Doktorantka opisała motywację podjęcia badań oraz sformułowała cele ogólne i szczegółowe, które chciała osiągnąć. Píše ona, że "Celem pracy jest zbadanie jak zmienia się charakter fazy amorficznej i krystalicznej węgla o hybrydyzacji sp^2 w warstwach diamentowych w zależności od rozmiaru krystalitów diamentowych." Zwraca również uwagę, na ważny aspekt wpływający na właściwości warstw diamentowych, związany z zawartością wodoru w warstwach. W tym kontekście formułuje następujący cel badań: "Jednym z celów pracy jest oszacowanie koncentracji wodoru w warstwach diamentowych w zależności od wielkości krystalitów diamentowych oraz określenie miejsc preferencyjnego występowania wodoru w postaci wiązań z węglem o hybrydyzacjach sp^2 i sp^3 ." We wstępie niejasne mogą być dla czytelnika następujące terminy: "intensywność znormalizowanego tła fotoluminescencji" czy "ogólna objętość granic ziaren", które dobrze byłoby zdefiniować na wstępie rozprawy.

W Rozdziale 1. Podstawowe właściwości strukturalne warstw diamentowych CVD, omówiono: (1) aspekt aplikacyjny prowadzonych badań, (2) techniki otrzymywania warstw diamentowych i ich właściwości strukturalne i powierzchniowe, (3) strukturę monokryształu diamentu oraz grafitu, (4) właściwości węgla amorficznego oraz trans-poliacetyleny. W tym rozdziale Doktorantka opisywała różne formy węgla amorficznego. Zabrakło mi jednak w tym opisie podkreślenia faktu, że w układach amorficznych nie mamy daleko-zasięgowego porządku, ale występować może krótko-zasięgowo uporządkowanie. Za parametr porządku w przypadku węgla amorficznego możemy przyjąć udział frakcji sp^2/sp^3 oraz zawartość wodoru w warstwie. W rozprawie doktorskiej wykorzystującej metody spektroskopowe, sugerowałbym użycie następującego podziału zakresu ultrafioletu: skrajny (od 10 do 121 nm), daleki (od 122 do 200 nm), pośredni (od 200 do 300 nm) oraz bliski (od 300 do 400 nm). W pracy Doktorantka dla promieniowania o długości 225 nm używa pojęcia "głęboki ultrafiolet" co jest bezpośrednim tłumaczeniem z języka angielskiego. Zamiast użytego przez doktorantkę określenia: "Stała

kryształu (długość krawędzi sześciangu, *Rys. 5 a*)" poprawniejsze byłoby użycie "Stała sieci krystalicznej". W innym miejscu Doktorantka pisze: "Heksagonalny grafit ma strukturę zbudowaną z płaszczyzn, w których każdy atom węgla tworzy z trzema sąsiadami dwa wiązania pojedyncze i jedno podwójne...". Lepiej byłoby napisać, że struktura grafitu składa się z warstw, w których występują sprzężone, sześcioczłonowe aromatyczne układy cykliczne w których każde wiązanie C-C w warstwie ma charakter zdelokalizowanego wiązania 1,5-krotnego. Innym zdaniem, które może być mylące dla czytającego jest: "Sąsiednie płaszczyzny oddziałujące ze sobą słabymi wiązaniami typu π , tworzą postać równoległych płaszczyzn (*Rys. 7*).". Między warstwami występują słabe oddziaływania typu Van der Waalsa. Jeżeli mówimy o wiązaniu typu π , to musimy pamiętać, że powstają one w wyniku bocznego nakładania orbitali atomowych (oprócz orbitali s).

W Rozdziale 2. Metodologia badań, omówiono następujące techniki badawcze: (1) spektroskopię Ramana, (2) spektroskopię promieniowania gamma, (3) pomiar kąta zwilżania, (4) mikroskopię elektronową oraz (4) mikroskopię sił atomowych. Dużo miejsca poświęcono w tym rozdziale interpretacji widm Ramana materiałów węglowych oraz opisano jakie informacje możemy uzyskać na temat właściwości warstw diamentowych biorąc pod uwagę odpowiednie parametry spektralne widm Ramana. Dla przykładu, stosunek intensywności integralnych pasma diamentowego do pasm grafitowych może nam powiedzieć jaka procentowa jest zawartość inkluzji węgla amorficznego w warstwie diamentowej. Analizując położenie oraz szerokość półkową pasma diamentowego możemy określić poziom naprężenia w warstwie diamentowej. Możemy oszacować wielkości krystalitów grafitowych w płaszczyźnie warstwy diamentowej analizując stosunek intensywności w pikach pasma D do G. Biorąc pod uwagę jednocześnie powyższy stosunek, tj. I_D/I_G oraz położenie pasma G można określić zawartości fazy amorficznej węgla o hybrydyzacji sp^3 . Koncentrację wodoru w warstwach diamentowych można oszacować analizując współczynnik nachylenia prostej odcinającej tło w widmie Ramana oraz intensywność w pikach pasma G. W celu oszacowania zawartości poszczególnych hybrydyzacji węgla oraz określenia stanów oksydacyjnych na powierzchni próbek diamentowych, możemy analizować pasmo C1s w widmie XPS. Wielkość ziaren diamentowych na powierzchni warstw możemy oszacować za pomocą obrazowania techniką elektronowej mikroskopii skaningowej (SEM) oraz mikroskopii sił atomowych (AFM). Rodzaj i stopień wysycenia powierzchni można opisać analizując pomiary kąta zwilżania.

W części dotyczącej aparatury pomiarowej (strona 30) zabrakło mi informacji jaka była na próbce moc promieniowania laserowego podczas rejestracji widm Ramana dla wzbudzeń 325, 488, 514,5 oraz 785 nm. Ten parametr jest szczególnie ważny w przypadku pomiarów materiałów węglowych. Zbyt wysoka moc promieniowania może mieć wpływ na kształt rejestrowanego widma Ramana, a co za tym idzie, może prowadzić do błędnych wniosków. Patrząc na wzór opisujący koncentrację wodoru w warstwach (strona 40), czy chociażby na współczynnik idealności warstwy (strona 31) rodzi się pytanie: "Jaki wpływ na otrzymane rezultaty, ma długość fali wzbudzającej?". Wiemy z literatury, że wzór na określenie wielkości krystalitów grafitowych L_a (nm) (strona 33), słuszny jest dla wzbudzenia o długości fali 514,5 nm. Został on uogólniony na inne długości fali światła wzbudzającego przez L.G. Cançado i innych (Appl. Phys. Lett. 2006, 88, 163106.). Przyjmuje on wtedy postać $L_a = (2.4 \times 10^{-10}) \lambda^4 (I_D/I_G)^{-1}$, w którym to explicite występuje długość fali wzbudzającej w czwartej potęgze.

W Rozdziale 3. Parametry techniczne procesu osadzania warstw diamentowych, opisano parametry syntezy warstw diamentowych. Doktorantka wyjaśnia w tym rozdziale, czym kierowała się w doborze materiałów do badań. Jej celem było wykonanie warstw diamentowych o podobnej grubości, w których stopniowo zmieniałyby się wielkości krystalitów. W Tabeli 4 przedstawione zostały parametry syntezy próbek diamentowych osadzonych na podłożach wykonanych z Si(100) typu n. Próbkę oznaczoną indeksem A zostały wykonane na Uniwersytecie w Bristolu w School of

Chemistry podczas trzymiesięcznego stażu naukowego Doktorantki, próbki dpk36, dpk37 oraz kwf wykonano w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy.

W Rozdziale 4. Wyniki pomiarów, opisano wyniki badań własnych w pięciu podrozdziałach.

W podrozdziale 4.1. Wyznaczanie podstawowych parametrów warstw diamentowych MCD, NCD, omówiono morfologię powierzchni oraz komponenty składowe widm Ramana badanych warstw diamentowych. W tabeli 5 podano oszacowane wielkości ziaren diamentowych wyznaczone na podstawie obrazów SEM oraz AFM. W danych dotyczących wielkości ziaren warstwy dpk36, według mnie, wkraść się błąd. Wartość średnia wynosząca $1,5 \mu\text{m}$ nie może być większa niż wartość maksymalna $0,600 \mu\text{m}$. Doktorantka na rysunku 23 zaprezentowała dekompozycję widm Ramana uzyskanych dla różnych warstw diamentowych z wykorzystaniem różnych linii wzbudzających. Po analizie tych danych możemy zauważyć, że w przypadku wzbudzenia 785 nm , należy być bardzo ostrożnym w ilościowej analizie składowych tych widm. Szczególnie ma to miejsce w tych przypadkach, gdy mamy słabo wyodrębnione pasma w analizowanym widmie. Dla próbki A1, A11 oraz kwf możemy zauważyć, że widma eksperymentalne mają bardzo podobny kształt, z kolei parametry spektralne odpowiadających sobie składowych różnią się dość znacznie. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest chociażby duży rozrzut punktów na rysunku 30 d), gdzie wykreślona jest zależność położenia pasma G do jego szerokości połówkowej. Oczywiście można podejmować kroki zmniejszające błąd rozkładu, np. przez lepsze ustalenie wyjściowych położenia składowych pasm, wykorzystując do tego celu, np. analizę wyższych pochodnych. W związku z powyższym, nasuwają się tutaj pytania: "Jaka procedura była zastosowana w wyborze punktu startowego w procesie rozkładu widma na składowe?", "Czy były podejmowane próby analizy wyników z wykorzystaniem innych funkcji spektralnych?", "W jaki sposób ta analiza wpłynęła na wielkość prostokątów niepewności analizowanych parametrów?". Analizując rysunek 24 widzimy, że stosunek intensywności w pikcie pasma D do G zależy od długości fali promieniowania wzbudzającego. Natura tego zjawiska jest dobrze opisana w literaturze przedmiotu. Rzeczą interesującą byłoby udzielenie odpowiedzi na pytanie: jak dobrze "pracuje" wzór podany przez L.G. Cançado ($L_a = (2.4 \times 10^{-10}) \lambda^4 (I_D/I_G)^{-1}$) w przypadku badanych warstw diamentowych?

W podrozdziale 4.2. Charakteryzacja węgla amorficznego w warstwach diamentowych MCD i NCD, analizowano w pierwszej kolejności wzajemne zależności pomiędzy takimi wielkościami jak: wielkość ziaren diamentowych (G size), współczynnik idealności $Q(A)$, stosunki intensywności w pikcie oraz intensywności integralnej pasma D do G (I_D/I_G), szerokość połówkowa pasma G (FWHM pasma G), położenie pasma G oraz D, współczynnik nachylenia tła (m), energia wzbudzająca, parametr m/I_G . Na podstawie powyższych danych Doktorantka wyciągnęła szereg interesujących wniosków, dotyczących właściwości fizykochemicznych warstw diamentowych. Zostało pokazane między innymi, że wraz ze zmniejszaniem się ziaren diamentowych udział innych struktur węglowych w warstwach rośnie (rośnie wielkość klastrów struktur węgla amorficznego). Pokazano, że istnieje korelacja pomiędzy wielkością tychże klastrów węglowych, a stopniem nachylenia tła fluorescencji w widmie Ramana. W podrozdziale 4.2 analizowano również dyspersję pasm G i D w celu uzyskania informacji na temat inkluzji węgla znajdujących się w warstwach diamentowych. Zaobserwowano, że spośród wszystkich warstw diamentowych największym uporządkowaniem fazy węgla amorficznego odznacza się próbka A27, która posiada prawie zerową dyspersję pasma G oraz silną dyspersją pasma D. Na podstawie zależności dyspersji pasma G od zawartości fazy krystalicznej sp^3 możliwe było określenie etapów trajektorii amorfizacji dla badanych warstw diamentowych. Wyciągnięto między innymi wniosek, że im „czystsza” warstwa diamentowa, tym bardziej amorficzny charakter węgla występuje na granicach ziaren. W drugiej części tego podrozdziału analizowano zależności pomiędzy takimi właściwościami warstw diamentowych jak wielkość krystalitów, zawartość fazy sp^2 , zawartością fazy węgla amorficznego sp^3 czy też zawartość wodoru. Zaobserwowano, że udział tetraedrycznego węgla amorficznego

(oraz wodoru) rośnie wraz ze zwiększaniem się rozmiaru ziaren diamentowych oraz ze wzrostem ilości krystalicznych struktur sp^3 . Pokazano, że wraz ze zwiększaniem się ziaren diamentowych, rośnie względny udział łańcuchów oraz pierścieni aromatycznych węgla, natomiast maleje zawartość fazy grafitowej. Poza tym, im więcej względnej frakcji tetraedrycznego węgla amorficznego jest w warstwie diamentowej, tym mniejsze są kryształity lub klastry grafitowe.

Podczas lektury tego podrozdziału, natknąłem się na stronie 58 na pewne niejasności. Porównując dane (odchylenia standardowe oraz średnie wielkości rozmiaru ziaren) zawarte w Tabeli 5 z prostokątami niepewności zamieszczonymi na rysunku 28 (przedstawia on zależność współczynnika idealności diamentu od średniej wielkości ziaren diamentowych) dostrzegłem pewne rozbieżności. Przyjmując, że został przyjęty rozkład normalny (rozkład Gaussa), trudno na podstawie błędów pomiarowych, stwierdzić jaki przyjęto poziom ufności w analizie danych eksperymentalnych. Doktorantka używa w rozprawie pojęcia "objętość granic ziaren", wydaje mi się że lepsze byłoby użycie "objętość przestrzeni między-ziarnowej", z tego względu że granice ziaren należą do defektów powierzchniowych.

W podrozdziale 4.3. Trans-Poliacetylen na granicach ziaren warstw diamentowych, analizowano parametry spektralne pasm związanych z trans-poliacetylenem w celu określenia ilości segmentów wchodzących w skład łańcucha oraz oszacowania zawartości t-Pa w warstwach diamentowych. Pokazano, że zawartość struktur t-Pa rośnie wraz ze zmniejszaniem się ziaren diamentowych oraz wraz ze zwiększaniem się całkowitego udziału węgla amorficznego w warstwie diamentowej. Na podstawie położenia pasm t-Pa oszacowano liczbę jednostek w łańcuchach, w przypadku próbki kwf łańcuchy składają się maksymalnie z ok. 50 jednostek, a najkrótsze składają się z 5 jednostek, dla warstw typu MCD łańcuchy posiadają od 19 do 25 jednostek, dla próbki A27 łańcuchy posiadają od 3 do 8 jednostek. W drugiej części podrozdziału badano czy istnieje związek pomiędzy procentową zawartością trans-poliacetylenu a relatywnymi frakcjami klastrów olefinowych, pierścieniowych oraz grafitowych w warstwach diamentowych. Pokazano, że im więcej łańcuchów t-Pa występuje w warstwie, tym większy jest relatywny udział klastrów grafitowych, a mniejszy pierścieni aromatycznych i łańcuchów w fazie amorficznej węgla.

W podrozdziale 4.4. Kompozycja warstw MCD i NCD, omówiono dla badanych warstw diamentowych: (1) względne udziały faz sp^2 i sp^3 węgla amorficznego, trans-poliacetylenu oraz diamentu krystalicznego, (2) rozkład przestrzenny poszczególnych struktur węglowych (kształt i wielkość kryształitów oraz dystrybucję części amorficznej), (3) rozkład przestrzenny naprężeń w warstwie. Wyciągnięto między innymi następujące wnioski: (a) dla warstw o nieuporządkowanych strukturach węgla amorficznego, zawartość fazy sp^3 rośnie wraz ze wzrostem wiązań t-Pa, (b) wraz ze zmniejszaniem kryształitów diamentowych zwiększa się inkorporacja innych struktur węglowych oraz zwiększa się objętość granic ziaren, (c) w próbkach z grupy A w ogólności stwierdzono większy udział naprężeń rozciągających, a dla próbek dpk36, dpk37 i kwf, naprężeń ściskających. Na rysunkach 58, 61, 64, 67, 70 trudno jest ocenić wielkość zmiany położenia pasma diamentowego, należałoby poprawić opis osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku oznaczonej kolorami. W drugiej części podrozdziału 4.2 analizie poddano dystrybucję faz amorficznych sp^2 i sp^3 oraz struktur trans-poliacetylenu w warstwach diamentowych o różnej morfologii powierzchni. Dla wszystkich warstw zaobserwowano, że maksymalna koncentracja struktur t-Pa pokrywa się z miejscami najbogatszymi w fazę amorficzną sp^2 .

W podrozdziale 4.5. Właściwości powierzchniowe warstw mikro i nano diamentowych, opisano wyniki badań zwilżalności oraz kompozycji chemicznej powierzchni badanych warstw diamentowych. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem wielkości ziaren oraz ilości krystalicznej fazy sp^3 rośnie wartość kąta zwilżania, co świadczy o dominującym wysyceniu powierzchni wodorem. W celu zbadania kompozycji chemicznej powierzchni wykorzystano analizę pasma C1s w widmie XPS. Doktorantka pisze: "Podczas procedury dopasowania wszystkie krzywe mogły zmieniać swobodnie położenie, jednak ustalono, że odległość pomiędzy pasmami sp^2 i sp^3 musi znaleźć się

w przedziale $0,90 \geq \Delta E_{sp^3-sp^2} \geq 0,70$, a odległość energii wiązań C-C sp^3 i CH_x w przedziale $0,55 \geq \Delta E_{CH_x-sp^3} \geq 0,45$ ". Pomimo nałożonych warunków na parametry "fitowalne", byłbym szalenie ostrożny w ilościowym interpretowaniu otrzymanych rezultatów. Myślę, że wyniki analizy przedstawione na rysunku 77 obarczone są dużą niepewnością. W podrozdziale 4.5 Doktorantka analizowała również zależność parametru m/I_G od stosunku zawartości fazy węgla amorficznego do fazy monokrystalicznego diamentu. Stwierdziła ona, że jest on tym mniejszy im bardziej nieuporządkowany charakter węgla amorficznego znajdującego się w warstwie diamentowej.

W rozdziale 5. Dyskusja, omówiono najważniejsze wnioski wypływające z badań mgr inż. Anny Dychalskiej. Na końcu tego rozdziału, zaproponowała ona możliwość rozszerzenia prowadzonych przez nią badań o pomiary z udziałem innych technik eksperymentalnych, które pozwoliłyby stwierdzić jakie są bezwzględne zawartości poszczególnych form węgla oraz wodoru w całej objętości warstw diamentowych. Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej, mogę stwierdzić, że cele, które Doktorantka postawiła w swojej pracy badawczej, zostały osiągnięte.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Dychalskiej zawiera bogaty materiał doświadczalny wraz z wnikliwą dyskusją, która daje głęboki wgląd w istniejące relacje pomiędzy różnymi formami węgla w warstwach diamentowych. Moją pozytywną ocenę merytoryczną wzmacnia dodatkowo fakt, że w tej tematyce mgr inż. Anna Dychalska opublikowała siedem artykułów w czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, takich jak *Optical Materials* (IF=2.799, 2 prace), *Diamond and Related Materials* (IF=2.650, 1 praca), *Applied Physics A* (IF=1.455, 1 praca), *Materials&Design* (IF=4,498, 1 praca), *Physical Review Applied* (IF=4.532, 2 prace) oraz *Material Sciences* (IF=0.610, 2 prace), przy czym w przypadku czterech publikacji jej nazwisko znajduje się na pierwszym miejscu na liście autorów. Oprócz tego może się ona pochwalić jeszcze współautorstwem 2 monografii oraz jednej publikacji spoza tematyki doktoratu opublikowanej w prestiżowym czasopiśmie *ACS Applied Materials & Interfaces* (IF=8.758). Doktorantka była także współautorem 13 prezentacji konferencyjnych. Wysoko oceniam też rozprawę doktorską mgr inż. Anny Dychalskiej pod względem formalnym. Autorka podzieliła opis wyników swoich badań w taki sposób, że układ rozprawy jest logiczny i przejrzysty. Wskazane w recenzji komentarze merytoryczne i uwagi edytorskie nie umniejszają bardzo wysokiej oceny rozprawy.

Pani mgr inż. Anna Dychalska swoje naukowe doświadczenie pogłębiała w czasie dwóch krótkoterminowych (do 3 miesięcy) zagranicznych staży odbytych na Uniwersytecie w Sydney oraz na Uniwersytecie w Bristolu. Była kierownikiem w projekcie finansowanych przez NCN (Preludium 13) oraz wykonawcą i kierownikiem w projektach finansowanych przez Politechnikę Poznańską (Działalność Statutowa - Młoda Kadra). Powyższa charakterystyka dowodzi, że na obecnym etapie kariery naukowej Doktorantka może pochwalić się solidnym dorobkiem naukowym, co niewątpliwie potwierdza jej pracowitość i zaangażowanie na polu nauki.

Na podstawie oceny przedstawionej rozprawy stwierdzam, że spełnia ona zwyczajowe i ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. W związku z powyższym, wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr inż. Anny Dychalskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Z uwagi na szeroki materiał eksperymentalny oraz poziom dyskusji naukowej wyników złożonych procesów fizykochemicznych występujących w cienkich warstwach diamentowych wnoszę wniosek o wyróżnienie niniejszej pracy doktorskiej.

Andrzej Zapin'ski



Instytut Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk

Mariana Smoluchowskiego 17, 60-179 Poznań
tel. 61 8695 112, 234, fax 61 8684-524
www.ifmpan.poznan.pl

Poznań, 18 stycznia 2021 r.

dr hab. Andrzej Łapiński, prof. IFM PAN
e-mail: lapinski@ifmpan.poznan.pl

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Dychalskiej pt.: "Badanie właściwości strukturalnych i powierzchniowych cienkich warstw diamentowych metodami spektroskopowymi"

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana przez mgr inż. Annę Dychalską w Instytucie Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej w Poznaniu pod opieką naukową dra hab. Mirosława Szybowicza, prof. PP. Praca poświęcona jest badaniom właściwości fizykochemicznych cienkich warstw diamentowych. Zawiera ona bogaty materiał doświadczalny wraz z wnikliwą dyskusją, która daje głęboki wgląd w istniejące relacje pomiędzy różnymi formami węgla w warstwach diamentowych. Wyniki badań zostały opublikowane w siedmiu artykułach w czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym, takich jak *Optical Materials* (IF=2.799, 2 prace), *Diamond and Related Materials* (IF=2.650, 1 praca), *Applied Physics A* (IF=1.455, 1 praca), *Materials&Design* (IF=4,498, 1 praca), *Physical Review Applied* (IF=4.532, 2 prace) oraz *Material Sciences* (IF=0.610, 2 prace). W przypadku czterech publikacji nazwisko Doktorantki znajduje się na pierwszym miejscu na liście autorów. Doktorantka może pochwalić się solidnym dorobkiem naukowym, doświadczeniem w kierowaniu projektami naukowymi oraz odbyciem stażów zagranicznych. Rozprawę doktorską wysoko oceniam pod względem formalnym oraz merytorycznym. Z uwagi na obszerny materiał eksperymentalny oraz poziom dyskusji naukowej wyników złożonych procesów fizykochemicznych występujących w cienkich warstwach diamentowych wnoszę wniosek o wyróżnienie niniejszej pracy doktorskiej.

Andrzej Łapiński