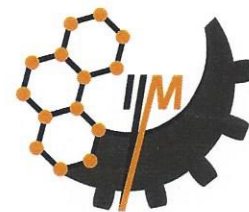


Politechnika Łódzka

Instytut Inżynierii Materiałowej



Łódź, dn. 04.01.2025 r.

Dr hab. inż. Anna Sobczyk-Guzenda, prof. PŁ
Instytut Inżynierii Materiałowej, Politechnika Łódzka
Tel. +42 631 30 73
e-mail: anna.sobczyk-guzenda@p.lodz.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Jankowskiego
pt. *“Warstwy dielektryczne tlenowęgliku krzemu (a-SiOC) wytwarzane z prekursorów krzemoorganicznych metodą CVD inicjowanych atomowym wodorem”*
zrealizowanej pod kierunkiem:
promotora: dr. hab. Pawła Uznańskiego, prof. CBMiM PAN
i promotorki pomocniczej: dr Agnieszki Walkiewicz-Pietrzykowskiej

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk (CBMiM PAN) z dnia 25.10.2024 r. oraz pisma Pana Prof. dr hab. Arkadiusza Chworosia Dyrektora CBMiM PAN w Łodzi dotyczącego wykonania recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Krzysztofa Jankowskiego

1. Tematyka rozprawy i określenie problematyki badawczej

Rozprawa doktorska poświęcona jest badaniom możliwości zastosowania metody chemicznego osadzania z fazy gazowej inicjowanej atomowym wodorem (RHP-CVD) do otrzymania powłok amorficznego tlenowęgliku krzemu a-SiOC:H z różnych prekursorów krzemoorganicznych. W badaniach zastosowano prekursory liniowe, dimetoksymetylosilan (DMMS), dietoksymetylosilan (DEMS) oraz cykliczne, oktametylo-1,4-dioksa-2,3,5,6-tetrasilacykloheksan (2D_2) i 1,3,5,7-tetrametylo-cyklotetrasiloksan (D_4^H). Procesy depozycji badane były w funkcji temperatury podłoża (T_s), która ma decydujący wpływ na strukturę powłok oraz szybkość ich wzrostu.

W literaturze tlenowęglik krzemu (SiOC) opisywany jest jako materiał, który może odznaczać się dużą różnorodnością składu chemicznego oraz mikrostruktur, w zależności od wybranych prekursorów, warunków sieciowania i pirolizy oraz potencjalnych zastosowanych dodatków. Najczęściej stosowanymi prekursorami są siloksany. Reakcje chemiczne prekursorów podczas ich zmiany z substancji organicznych w amorficzną ceramikę zachodzą głównie poprzez reakcje rodnikowe z utworzeniem gazowych produktów ubocznych, takich jak metan i wodór. SiOC wykazuje dobrą odporność termiczną, odporność na ścieranie i niską energię powierzchniową. Ponadto powłoki ochronne wytworzonego z niego mogą być

Politechnika Łódzka Wydział Mechaniczny
Siedziba: 90-537 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15,

Adres korespondencyjny:
90-924 Łódź, ul. Żeromskiego 116
NIP: 727-002-18-95, REGON 000001583

Instytut inżynierii Materiałowej
Bud A18 Sekretariat IV piętro pok. 444

e-mail: w1111@adm.p.lodz.pl
tel. 42 631 30 30
www.im.p.lodz.pl



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

używane w nieprzyjaznych środowiskach, takich jak wysoka zawartość wilgoci, podwyższona temperatura, żrące czynniki chemiczne, czy promieniowanie UV. Ponadto cechuje się on niską stałą dielektryczną oraz dobrymi właściwościami mechanicznymi. Dzięki czemu może być wykorzystywany w układach scalonych, pamięciach elektronicznych, fotowoltaice, w ogniwach litowo-jonowych, jako kompozytowy nanomateriał w superkondensatorach, ale i także znajduje zastosowanie jako biomateriał.

Do wytwarzania powłok α -SiOC:H najczęściej wykorzystywane są metody: PECVD (*plasma enhanced chemical vapor deposition*), żół-żel oraz magnetronowe rozpylanie. Pan mgr. K. Jankowski w swojej pracy doktorskiej postanowił wykorzystać unikalną i alternatywną metodą do w.w. - RHP CVD (*remote hydrogen plasma chemical vapor*). Technika ta została opracowana i rozwinięta przez prof. A.M. Wróbla w latach 90-tych minionego stulecia w CBMiM. Profesor A. M. Wróbel wraz z zespołem wytworzył cienkie powłoki węgla krzemu, węglikoazotku krzemu oraz tlenowęgla krzemu, przebadał je oraz szeroko opublikował wyniki z tych badań. Ponadto w ramach tej tematyki powstało także kilka prac doktorskich: Pani dr Agnieszki Walkiewicz-Pietrzykowskiej pt.: „Wytwarzanie materiałów cienkowarstwowych związków krzemu organicznych procesie chemicznego nanoszenia z fazy gazowej (CVD) inicjowanymi reaktywnymi atomami”, Pani dr Iwony Błaszczuk-Lęzak pt.: „Cienkowarstwowe materiały węglazotku krzemu wytwarzane z prekursorów krzemu organicznych selektywnym procesie plazmowym CVD”, oraz Pana dr Bartosza Głębockiego pt.: „Otrzymywanie i chemiczna modyfikacja powierzchni cienkich warstw krzemowych wytwarzanych z prekursorów krzemooorganicznych w selektywnym procesie CVD”. Niniejsza dysertacja doktorska stanowi kontynuację i rozwinięcie powyżej opisanych prac badawczych.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej (układ pracy, struktura podziału treści, kolejność rozdziałów i ich kompletność)

Praca doktorska liczy łącznie 119 stron. Składa się z 5 rozdziałów merytorycznych: pierwszy z nich to wstęp teoretyczny, w drugim rozdziale został przedstawiony cel i zakres pracy, w trzecim metodyka badawcza, w czwartym zostały omówione wyniki z przeprowadzonych badań wraz z ich interpretacją i dyskusją. Ta część pracy podzielona została na cztery podrozdziały. Każdy poświęcony jest powłokom otrzymanym z czterech różnych prekursorów i zakończony jest krótkim podsumowaniem. Ostatni, piąty rozdział z części doświadczalnej stanowi trójstronnicowe podsumowanie wraz wnioskami. Szósty rozdział stanowi spis literatury, a w siódmym zaprezentowane zostały osiągnięcia naukowe doktoranta. Ponadto w pracy znajduje się także spis treści, streszczenia napisane w języku polskim i angielskim oraz objaśnienia skrótów i symboli używanych w pracy. W sumie przytoczone są 153 pozycje literaturowe. Najstarsza pozycja literaturowa jest z 1956 r., a najnowsza z 2023 r. Układ pracy jest więc typowy dla rozpraw doktorskich, z właściwą proporcją pomiędzy częścią literaturową, a doświadczalną.

3. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

3.1. Wstęp teoretyczny – rozdział 1

Przegląd literatury składa się z dwóch głównych podrozdziałów. Podrozdział drugi został podzielony na siedem sekcji. Część teoretyczna pracy napisana jest syntetycznie, z

uwzględnieniem 72 pozycji literaturowych. W pierwszej części wstępu teoretycznego doktorant omawia ogólnie właściwości tlenowęgliku krzemu (SiOC) i wskazuje z jakich rodzajów prekursorów ten materiał może być otrzymywany. W tym podrozdziale omówiony także został diagram fazowy tego materiału i jego zastosowania. W rozdziale drugim doktorant scharakteryzował metody powszechnie używane do otrzymywania cienkich powłok typu SiOC uwzględniając wykorzystywane prekursory skupiając się na wadach i zaletach tych technik. W podrozdziale 1.2.5 scharakteryzował metody chemicznego osadzania z fazy gazowej, a także sklasyfikował je z uwzględnieniem ciśnienia panującego w komorze reakcyjnej, temperatury podłoża oraz rodzaju aktywacji, a także rodzaju prekursorów. W podrozdziale 1.2.6 opisał mechanizmy reakcji chemicznych zachodzących procesach CVD. W podrozdziale 1.2.7. doktorant przedstawił ograniczenia metody PECVD do wytwarzania cienkich powłok typu a-SiOC:H i wskazał jednoznacznie, że rozwiązanie tego problemu upatruje się w metodzie osadzenia chemicznego z fazy gazowej indukowanego atomowym wodorem, co stanowi nurt jego pracy doktorskiej.

Uwagi szczegółowe i pytania do doktoranta dotyczące pierwszego rozdziału pracy:

1. Doktorant powinien wyjaśnić czym są depozyty warstwowe w odniesieniu do powłoki SiOC.
2. Doktorant powinien uszczegółowić i szerzej zdefiniować pojęcie warstwa polimerowa i warstwa ceramiczna w odniesieniu do powłok SiOC. Czy powłoki otrzymane w pracy można nazwać polimerowymi zgodnie z powszechnie używaną definicją materiału polimerowego? Czy otrzymane powłoki posiadają cechy charakterystyczne polimerów. Może bardziej zasadne byłoby użycie nazwy stosowanej w książce prof. Tyczkowskiego – polimer plazmowy?
3. W wielu miejscach w wstępie teoretycznym doktorant nie odnosi do konkretnych pozycji literaturowych, z których zaczerpnął dane. Przykładowo na stronie 12,13,14 brak jest odnośników literaturowych do przedstawianych danych literaturowych (podrozdział 1.2.1 i 1.2.2.) oraz przy diagramie fazowym tlenowęgliku krzemu (SiOC) (Rys. 1.1).
4. W podrozdziale 1.2.3 znajdują się sprzeczne informacje. Doktorant opisuje, że powłoki otrzymywane metodą zol-żel mniej narażone na działania mechaniczne wypala się w temperaturze 150-250°C, a ceramizacja powłok z utworzeniem tlenowęgliku krzemu dokonuje się w temperaturze 800 do 1200 °C, a następnie na następnej stronie jest napisane, że metoda zol-żel jest procesem niskotemperaturowym.
5. Doktorant w całej pracy doktorskiej używa zamiennie pojęć: powłoka, warstwa, folia. Które, zdaniem doktoranta z ww. pojęć jest prawidłowe w odniesieniu do prezentowanych w pracy materiałów?
6. Na stronie 24 znajduje się pojęcie „abstrakcja wodoru”. Proszę wyjaśnić znaczenie tego pojęcia.
7. Zdaniem recenzenta doktorant powinien omówić znacznie szerzej powłoki uzyskiwane metodą RHP CVD, uwzględniając ich rodzaje charakteryzując ich właściwości, zastosowania oraz rodzaj zastosowanych prekursorów, co

podkreśliłoby innowacyjny charakter badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej

3.2. Cel i zakres pracy – rozdział 2 oraz część eksperymentalna – rozdział 3

W rozdziale 2 przed przejściem do omówienia celu i zakresu pracy doktorant wymienił metody, które są wykorzystywane do syntezy cienkich powłok, co częściowo pokrywa się z informacjami zawartymi w rozdziale pierwszym. Ponadto w tym miejscu podkreślił zalety wykorzystania prekursorów krzemoorganicznych stosowanych w wyżej wymienionych metodach. Doktorant w swojej dysertacji nie zdecydował się na postawienie hipotezy, tylko skupił się na sformułowaniu celu pracy, co oczywiście nie jest wymagane i w żaden sposób nie umniejsza wartości merytorycznej pracy. W pracy do wytworzenia powłok SiOC:H zdecydował się na wykorzystanie czterech prekursorów z dwóch grup - cyklicznych: oktametylo-1,4-dioksa-2,3,5,6-tetrasilacykloheksanu (2D_2) i 1,3,5,7-tetrametylocyklo-tetrasiloksanu (D_4^H), posiadających mniej grup metylowych oraz liniowych (posiadających więcej grup metylowych) które są monomerami w klasycznych syntezach polimerów siloksanowych (polisilaeteru-PSE i polimetylohydrosiloksanu - PMHS) i drugiej grupy alkoksyhydrosilanów – dimetoksymetylosilanu (DMMS) i dietoksymetylosilanu (DEMS), które głównie stosowane są w metodzie zol-żel. Następnie doktorant przedstawił zakres prac zrealizowanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej od rozbudowy reaktora poprzez badania jakie wykorzystał do oceny składu chemicznego, struktury chemicznej, morfologii i topografii powierzchni oraz powiązania tych parametrów z właściwościami mechanicznymi i optycznymi powłok. W rozdziale trzecim została opisana część eksperymentalna pracy, która obejmuje charakterystykę wykorzystanych materiałów i odczynników chemicznych, aparaturę użytą do nałożenia powłok i zakres wartości parametrów roboczych, które dobrał doświadczalnie doktorant dla poszczególnych prekursorów. W kolejnych podrozdziałach tej części omówił warunki pomiarowe szerokiej gamy metod analitycznych użytych do charakterystyki powłok SiOC:H.

Uwagi szczegółowe i pytania do doktoranta dotyczące drugiego i trzeciego rozdziału pracy:

1. Na stronie 26 brak jest wyjaśnienia skrótów technologii VLSI i ULSI, nie znajdują się też one w objaśnieniach skrótów i symboli stosowanych w pracy.
2. Także na stronie 26 przy wymienianiu metod nanoszenia cienkich powłok SiOC, brak jest odnośników literaturowych,
3. W celu pracy zapis podziału zastosowanych prekursorów na 3 grupy jest mylący. Tym bardziej, że wykorzystane zostały cztery prekursory dwa cykliczne i dwa liniowe. Ponadto nie jest jasno napisane czy wszystkie prekursory są po raz pierwszy wykorzystane do wytworzenia z nich powłok SiOC, czy tylko trzy z nich. Powinno to być wyraźnie wyartykułowane.
4. W całej pracy, nie tylko w części eksperymentalnej doktorant używa zamiennie nazwy powłoki a-SiOC:H z a-SiOC, w sposób zupełnie przypadkowy. Może powinien używać nazewnictwa a-SiOC: dla powłok o charakterze polimerowym, a a-SiOC dla powłok o charakterze ceramicznym?
5. W zakresie pracy jest napisane, że doktorant rozbudował istniejący reaktor, a w opisie szczegółowym nie ma żadnej wzmianki na ten temat.

6. Przy wyznaczaniu gęstości, brak jest informacji z jaką dokładnością były ważone próbki i w jaki sposób wyznaczana była grubość otrzymanych powłok.
7. W opisie metodyki oceny morfologii powierzchni metodą SEM i EDX brak jest informacji dotyczącej wyszczególnienia parametrów przy jakich analiza była przeprowadzana.
8. Proszę wyjaśnić, dlaczego do oceny chropowatości powierzchni doktorant wykorzystał tylko jeden z jej parametrów – średnią kwadratową RMS?

3.4. Wyniki – rozdział 4

Uważam podzielenie tej części pracy na trzy podrozdziały opisujące kolejno powłoki otrzymywane z czterech różnych prekursorów jest bardzo dobrym rozwiązaniem. Pozwala to na przedstawienie wyników w sposób zrozumiały dla czytelnika.

W pierwszej kolejności w podrozdziale 4.1 Doktorant scharakteryzował cienkie powłoki tlenowęgla krzemu otrzymywane z prekursorów alkoksyhydrosilanowych (DMMS i DEMS). Powłoki te były otrzymane w szerokim zakresie temperatur podłoża mieszczącym się w przedziale od 30 do 350°C Dla tak różnych parametrów doktorant wyznaczył kinetykę szybkości nakładania w zależności od czasu i temperatury podłoża, szczegółowo przeanalizował strukturę chemiczną powłok z wykorzystaniem spektroskopii w podczerwieni i spektroskopii NMR oraz XPS. Wyniki z analizy FTIR zastawił w sposób bardzo przejrzysty w tabeli 4.1.1. Na uwagę zasługuje przedstawienie wycinka widma FTIR w zakresie liczb falowych 1500-400 cm^{-1} zebranego w trybie transmisyjnym przy dwóch kątach padania wiązki analizującej w stosunku do powierzchni próbki, co pozwoliło na śledzenie formowania się amorficznej sieci a-SiOC w funkcji temperatury podłoża, analogicznie jak amorficznej krzemionki poprzez porównanie kolektywnych drgań sieci SiO_2 pod postacią fononów podłużnych LO do poprzecznych TO. Kolejną mocną stroną niniejszej pracy doktorskiej jest szczegółowe zaproponowanie hipotetycznych mechanizmów najważniejszych reakcji chemicznych jakie zachodziły w różnych etapach syntezy zarówno powłok otrzymanych z prekursorów alkoksyhydrosilanowych jak i otrzymywanych z prekursorów cyklicznych, które zostały opisane w dalszych częściach pracy. Na końcu rozdziału poświęconemu omówieniu wyników otrzymanych z prekursorów liniowych było przedstawienie wyników z badań gęstości powłok, topografii i morfologii powierzchni powiązanej z konformalnością powłok, właściwości optycznych (współczynnik załamania światła) i właściwości mechanicznych takich jak twardość, elastyczność, współczynnik tarcia oraz pomiary adhezji. Dla tych prekursorów udało się doktorantowi ustalić temperaturę przejścia, w których dochodzi do wzrostu ich gęstości, które skorelował z właściwościami optycznymi.

W podrozdziałach 4.2 i 4.3 doktorant omówił powłoki otrzymane odpowiednio z prekursorów $^2\text{D}_2$ oraz D_4^{H} . Zdaniem doktoranta ten pierwszy nie został jeszcze do tej pory wykorzystany do otrzymywania powłok typu SiOC, a drugi był wykorzystywany jedynie do syntezy powłok metodą HTP (ang. *hydride transfer process*). W ramach badań nad powłokami otrzymanymi z $^2\text{D}_2$ została przeprowadzona szczegółowa ocena struktury chemicznej i składu fazowego samego prekursora jak i ocena szybkości osadzania z niego powłok, struktura chemiczna z wykorzystaniem technik FTIR i NMR, XPS, analizy termogravimetrycznej TGA, topografii powierzchni z wykorzystaniem techniki AFM, właściwości optycznych (pomiarów fotoluminescencji, współczynnika załamania światła).

Podobnie jak w przypadku wcześniej opisanych prekursorów alkoksyhydrosilanowych udało się wyznaczyć tzw. temperaturę przejścia w której następuje zmiana w wartościach gęstości spowodowanej zwiększeniem stopnia ich sieciowania, która udaje się skorelować z innymi właściwościami fizycznymi powłok. Ciekawym wynikiem w tej części pracy jest porównanie powłoki otrzymanej z $^2\text{D}_2$ w powłoką polimeru silaeterowego otrzymanego metodą *spin-coating*, a następnie poddanego działaniu plazmy wodorowej RHP CVD. Z kolei w ramach badań nad powłokami otrzymanymi z drugiego cyklicznego prekursora D_4^{H} zmierzona została szybkość wzrostu powłoki w funkcji temperatury podłoża, przedstawiono budowę chemiczną powłok w wykorzystaniu ww. technik, przedstawiono skład elementarny (objętościowy) powłok z wykorzystaniem techniki EDX, wyniki z analizy TGA, topografię powierzchni, konformalność powłok, zmiany gęstości i zmiany we właściwościach optycznych. W tym podrozdziale badano dodatkowo produkty fazy gazowej, ewakuowane z objętości reaktora i nagromadzone w wymrażaczu oraz polimer PHMS nie poddany żadnej modyfikacji oraz poddany działaniu atomowego wodoru z wykorzystaniem metody RHP CVD.

Uwagi szczegółowe i pytania do Doktoranta dotyczące czwartego rozdziału pracy:

1. Na stronie 37 w podrozdziale 4.1 znajduje się błąd edycyjny „nowy powstały”.
2. Dlaczego w powłokach otrzymanych przy wysokich temperaturach otrzymanych z prekursorów DMS i DEMS nie wykazano obecności wiązań typu Si-C w widmie FTIR?
3. W punkcie 4.1.2. na stronie 39 znajduje się stwierdzenie, że: „... następuje przesunięcie głównego maksimum w stronę niższych liczb falowych, tj. z 1046 do 1032 cm^{-1} DMMS i z 1038 do 1018 cm^{-1} dla DEMS. Z czego wynikają te różnice w przesunięciach położenia pików w zależności od użytych prekursorów.
4. W podrozdziale 4.1.6. doktorant często używa pojęcia: „wielkość ziaren”, czy to sformułowanie jest prawidłowe, biorąc pod uwagę fakt, że doktorant zakłada, że otrzymane powłoki są amorficzne?
5. Na żadnym z rysunków w rozdziale 5 pracy nie zostały umieszczone słupki błędów. Czy to oznacza, że takie pomiary jak: gęstość, współczynnik załamania światła, chropowatość twardość, adhezja, współczynnik tarcia były wykonywane tylko w jednym powtórzeniu?
6. Czy „szorstkość powierzchni” oznacza to samo co „chropowatość powierzchni” w terminologii materiałowej?
7. Doktorant używa zamiennie pojęć konformalność oraz konforemność? Czy są to synonimy biorąc pod uwagę równomierność rozmieszczenia powłoki grubości powłoki na podłożach o skomplikowanych kształtach?
8. Dlaczego doktorant nie zbadał składu fazowego otrzymanych powłok, a jedynie z badań z wykorzystaniem spektroskopii FTIR wyciąga wnioski, że we wszystkich przypadkach (tzn. przy różnych temperaturach podłoży) otrzymał powłokę amorficzną?
9. W podrozdziale 4.2.1. na stronie 56 znajduje się zbyt długie wprowadzenie dotyczące materiału powłokowego postaci SiC, który nie jest przedmiotem badań w niniejszej pracy doktorskiej.

10. Na stronie 57 znajduje się błąd edycyjny zamiast „syntezy” powinna być „synteza”.
11. Na stronie 58 podrozdziale 4.2.2. znajduje się niezrozumiałe: zdanie cytuję: „Strukturę oktametylo-dioksa-tetrasilacykloheksanu rozwiązano już wcześniej¹¹⁹, jednak w przypadku obecnej analizy część niezależna została przypisana inaczej”.
12. Na stronie 62 zamiast stwierdzenia „pomiaru temperatury XRD” powinno być „pomiaru temperatury DSC”.
13. W jaki sposób została oszacowana przybliżona liczba rodników wodorowych na cząsteczkę związku źródłowego 2D_2 , w zastosowanych warunkach eksperymentalnych? Doktorant stwierdził, że jest ich 300.
14. Mało zrozumiałe jest też stwierdzenie znajdujące się na stronie 63 cytuję: „Dla podwyższonych temperatur podłoża te dominują struktury usieciowane z małą zawartością grup organicznych nad strukturami polimerowymi otrzymywanymi w niskich temperaturach do 150°C”. Proszę wyjaśnić znaczenie tego sformułowania.
15. Opisy rysunków 4.2.7, 4.2.10, 4.2.11 są mało czytelne.
16. Dlaczego doktorant używa zamiennie skrótów RHP i HRP?
17. Na stronie 70 znajduje się błąd edycyjny: „działu tlenu” zamiast „udziału tlenu”
18. Doktorant zaobserwował, że w przypadku powłok PSM modyfikowanych metodą RHP CVD po przechowywaniu próbek warunkach atmosferycznych zachodzi ich utlenianie. Czy istnieje niebezpieczeństwo, że powłoki otrzymane metodą RHP CVD będą także podatne na utlenianie w trakcie ich przechowywania?
19. Doktorant przebieg zmian grubości powłok w trakcie czasu depozycji przedstawił tylko dla prekursora D_4^H . Proszę o podanie grubości powłok otrzymanych z pozostałych prekursorów.
20. Jakiej grubości były powłoki, które zostały poddane badaniu EDX - podrozdział 4.3.4.4.?
21. Czy metoda EDX może być stosowana do oceny zawartości węgla w cienkich powłokach?
22. Dlaczego w zakresie badań przeprowadzonych w trakcie realizacji pracy doktorskiej nie zostały przeprowadzane badania elektryczne (przykładowo wyznaczenie względnej przenikalności elektrycznej), co sugeruje tytuł rozprawy doktorskiej: „Warstwy dielektryczne tlenu węgla krzemu wytwarzane z prekursorów krzemoorganicznych metodą CVD inicjowaną atomowym wodorem”.
23. Cenne byłoby też umieszczenie w pracy wyników z badań właściwości mechanicznych powłok otrzymywanych z prekursorów cyklicznych tak jak to było zaprezentowane dla prekursorów DMMS i DEMS.

3.5. Podsumowanie i wnioski – rozdział 5.

W trzystronicowym rozdziale piątym doktorant podsumował swoją pracę doktorską, posiłkując się trzema tabelami przedstawiającymi parametry depozycji, zestawienie temperatur przejścia, oraz energie aktywacji, a także wyniki z badań podstawowych właściwości. Ponadto w tym miejscu także przedstawił najważniejsze wnioski w formie opisowej wykazując tym samym, że założony cel pracy został zrealizowany. Do tej części nie mam żadnych uwag.

4. Wnioski końcowe

Podsumowując, chciałabym podkreślić, że jestem pod wrażeniem planu badawczego, który pomimo, że jest wielowątkowy, to został przez doktoranta dobrze przemyślany. Rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom zarówno ogólnej wiedzy teoretycznej jak i zakresu przeprowadzonych badań, przedstawienia wyników i dyskusji wraz w zaprezentowaniem możliwych mechanizmów reakcji jakie zachodzą w trakcie syntezy powłok otrzymywanych z różnych rodzajów prekursorów. Ze względu na przedstawione w niej wartości naukowe i znaczenie poznawcze, stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz przyczynia się do poszerzenia wiedzy w dyscyplinie nauki chemiczne i stanowi wysoki potencjał aplikacyjny.

W dysertacji można zauważyć niedociągnięcia natury edytorskiej, a liczne pytania i uwagi są jedynie zaproszeniem doktoranta do dyskusji naukowej w czasie obrony.

Podsumowując, chciałabym podkreślić, że praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Jankowskiego pt. *“Warstwy dielektryczne tlenowęgliku krzemu (a-SiOC) wytwarzane z prekursorów krzemooorganicznych metodą CVD inicjowanych atomowym wodorem”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki chemiczne określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2021 r. poz. 478). Wnoszę więc o przyjęcie recenzowanej rozprawy oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Krzysztofa Jankowskiego do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

