



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ FIZYKI TECHNICZNEJ
I MATEMATYKI STOSOWANEJ



DF/63/120/2023

dr hab. Tomasz J. Wąsowicz, prof. PG
Zakład Spektroskopii Układów Złożonych
Instytut Fizyki i Informatyki Stosowanej
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej
Politechnika Gdańska

Gdańsk, dnia 04.10.2023r.

Recenzja pracy doktorskiej magistra inżyniera Macieja Chomskiego
pt. „**Właściwości magnetyczne holmu w stanach wzbudzonych**”

Współczesna inżynieria materiałowa stymuluje rozwój materiałów o możliwie najszerszej funkcjonalności charakteryzującej się współistnieniem w nich różnorodnych właściwości fizykochemicznych. Cały szereg z tych własności wynika ze struktury elektronowej pierwiastków użytych do budowy takich materiałów. Przykładem takiego pierwiastka jest holm będący metalem należącym do grupy lantanowców w układzie okresowym. Lantanowce charakteryzują się specyficzną budową poziomów energetycznych prowadzącą do ich wyjątkowych własności magnetycznych. Dlatego z roku na rok lantanowce używane są coraz częściej do konstruowania zaawansowanych technologicznie urządzeń wykorzystywanych w motoryzacji (do budowy katalizatorów, napędów hybrydowych), telekomunikacji (telefony, ekrany), czy też do produkcji sprzętu komputerowego (twarde dyski, monitory ciekłokrystaliczne). Holm zyskuje na znaczeniu szczególnie w sektorze nowych technologii informatycznych, jako składnik materiału kwantowego wykorzystywanego w charakterze nośnika ultra-gęstych pamięci magnetycznych. Zainteresowaniem cieszą się też czteroskładnikowe monokryształy o strukturze spinelowej domieszkowane holmem, ponieważ mogą one znaleźć zastosowanie w energetyce, jako materiały magnetyczne do kondensatorów, transformatorów czy też magnetoptycznych urządzeń

przełączających. Atomy holmu poddają się wydajnemu pułapkowaniu i chłodzeniu laserowemu w pułapkach magnetoptycznych umożliwiając np. formowanie na jego bazie kondensatu Bosego-Einsteina. Należy jeszcze wspomnieć o istotnej funkcji holmu i całej grupy lantanowców w astrofizyce. Ich widma wykorzystywane są w oznaczaniu obfitości występowania pierwiastków chemicznych we Wszechświecie. Ponadto analiza ich widm prowadzi do wyjaśnienia procesów fizykochemicznych zachodzących w gwiazdach i ich otoczeniu, umożliwiając formułowanie precyzyjnych modeli budowy i ewolucji gwiazd oraz ich najbliższego sąsiedztwa.

We wszystkich tych zastosowaniach konieczna jest dogłębna znajomość struktury elektronowej pierwiastków oraz wpływu zewnętrznych pól elektrycznych i magnetycznych na tę strukturę. I właśnie przedstawiona do recenzji praca doktorska magistra inżyniera Macieja Chomskiego dostarcza takich nowych danych ilościowych dotyczących struktury elektronowej i oddziaływań magnetycznych atomu holmu. Została ona wykonana w Zakładzie Inżynierii i Metrologii Kwantowej Instytutu Badań Materiałowych i Inżynierii Kwantowej Politechniki Poznańskiej pod kierunkiem dr. hab. Bogusława Furmanna, prof. PP.

Do oceny rozpraw doktorskich stosuje się obecnie art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z późniejszymi zmianami (dalej zwanej Ustawą). W myśl tego przepisu, a dokładniej punktu drugiego tego artykułu, należy ocenić i uzasadnić, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Ocenę rozpocznę od wskazania celu badań. Mając na uwadze opisane zastosowania doktorant podjął się pomiaru stałych struktury nadsubtelnej (A i B) i współczynników Landégo (g_J) poziomów elektronowych atomu holmu przy użyciu techniki laserowo indukowanej fluorescencji (LIF) ze wzbudzeniem przestrajalnymi laserami barwnikowymi o pracy ciągłej, źródłem w postaci lampy wyładowczej z katodą wnątkową, sprzężonych z monochromatorem i detektorem w postaci fotopowielacza. Celem szczegółowym było zweryfikowanie hipotezy istnienia nowych poziomów energetycznych holmu.

Rozprawę doktorską stanowi zbiór sześciu wieloautorskich i powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w uznanym spektroskopowym czasopiśmie „Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer”. Oprócz artykułów rozprawa zawiera trzydziestopięciostronicowe omówienie (dalej zwane przewodnikiem po publikacjach lub krótko przewodnikiem) podjętej tematyki badawczej i metodologii badań. W szczególności przewodnik po publikacjach rozpoczyna się wstępem, w którym doktorant omawia własności i potencjalne zastosowania atomu holmu. Następnie prezentuje on ideę pomiarów, układ pomiarowy i prezentuje szczegóły eksperymentów. W wykazie prac doktorant omawia otrzymane wyniki i we wnioskach je podsumowuje. Na koniec zamieszczono oświadczenia doktoranta i współautorów o wniesionym wkładzie w przygotowanie każdej publikacji, a także artykuły wchodzące w skład rozprawy doktorskiej.

Kolejność prezentacji artykułów w przewodniku jest logiczna. W pierwszej pracy (będę się odnosił do numeracji podanej w punkcie 4 ww. przewodnika) skupiono się na pomiarach stałych struktury nadsubtelnej dla 43 poziomów elektronowych konfiguracji nieparzystych atomu holmu o znanych energiach. Otrzymano tu 27 nowych stałych A i B . Dla czterech poziomów konfiguracji nieparzystych holmu i trzech parzystych wyznaczono stałe A i B z większą precyzją.

Druga publikacja rozszerza zakres badań podjętych w pierwszej pracy. W oparciu o analizę 113 dostępnych niesklasyfikowanych linii widmowych holmu Doktorant stawia hipotezę istnienia nieodkrytych dotąd poziomów energetycznych holmu. Doświadczalnej weryfikacji dokonuje on rejestrując strukturę nadsubtelną niesklasyfikowanej linii widmowej w kilku przewidywanych kanałach fluorescencji. W rezultacie w publikacji tej zidentyfikowano i opisano 35 nieznanymi poziomów konfiguracji nieparzystych holmu oraz wyznaczono dla nich wartości stałych A i B . Co więcej wyniki te pozwoliły na sklasyfikowanie aż 256 linii widmowych w widmie holmu. Podobną, co do metodologii i stawianych hipotez badawczych, publikacją jest ta oznaczona numerem 6. W tej pracy, poza analizą stałych A i B znanych poziomów, zidentyfikowano 19 nowych nieparzystych poziomów elektronowych oraz 8 parzystych, a także opisano ich własności, takie jak energie, stałe struktury nadsubtelnej. W tym

miejscu chciałbym dodać, że z samego faktu istnienia możliwości pomiaru jakiejś wielkości fizycznej nie zawsze wypływa użyteczność tych wyników, chociaż mogą być one poznawczo interesujące. Dopiero, kiedy jesteśmy w stanie sformułować i zweryfikować hipotezy badawcze możemy podać wnioski szczegółowe i wyjaśnić obserwowane zjawiska. Te dwie publikacje mają te cechy i dlatego szczególnie mi się podobały.

Problematyka podejmowana w pracach 3-5 stanowi kolejny etap w poznawaniu własności magnetycznych atomu holmu. Różnią się jednak one celami i interpretacją. W pracy numer trzy podjęto się próby analizy przejść optycznych, które potencjalnie mogłyby być wykorzystane w procesie chłodzenia laserowego holmu w pułapkach magnetoptycznych. W szczególności przeanalizowano struktury nadsubtelne i zeemanowskie sześciu linii widmowych holmu: $\lambda = 660,747, 608,179, 598,285, 545,190$ oraz $486,039$ nm. W rezultacie otrzymano stałe A, B i g_J . Oprócz ilościowego opisu tych poziomów energetycznych w pracy tej szeroko dyskutowane są właściwości fizyczne, jakie musiałyby być spełnione przy takim chłodzeniu. Z kolei prace cztery i pięć są typowymi pracami wpisującymi się w problematykę badań podstawowych. Dostarczają one łącznie 46 doświadczalnie wyznaczonych czynników g_J Landégo dla stanów elektronowych należących do konfiguracji parzystych i nieparzystych atomu holmu. Korzystając z obliczeń pół-empirycznych otrzymano także wartości teoretyczne tych stałych.

Ocena niniejszej rozprawy doktorskiej jest o tyle łatwiejsza, że publikacje zostały już zrecenzowane przez ekspertów i dopuszczone do druku. Zastosowana metodologia pomiaru i analizy jest uzasadniona merytorycznie i nie mam do niej najmniejszych zastrzeżeń. Rezultaty prezentowane w artykułach w przeważającej mierze są wynikami nowymi. Ponadto wszystkie wyniki prezentowane w publikacjach charakteryzują się dużym poziomem precyzji. Cele rozprawy doktorskiej w pełni zostały zrealizowane, a sama rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Wywiązując się z roli recenzenta muszę jednak wymienić nasuwające mi się pytania oraz znalezione w tekście przewodnika drobne niedociągnięcia i niefortunne sformułowania, które nie zmieniają mojej pozytywnej opinii o rozprawie doktorskiej Pana

mgr. inż. Macieja Chomskiego. Oto najważniejsze z nich: strona 9, ostatni akapit – zamiast „(...) konieczne jest przewidzenie rozsunęcia (...)” proponowałbym zapisać: „konieczna jest znajomość rozszczepienia zeemanowskiego”; str. 10, drugi akapit, zdanie „(...) umożliwia lepszy opis oddziaływań (...)” – co doktorant rozumie pod pojęciem „lepszy opis”? Strona 14, drugi akapit, pojawia się zdanie „Ciśnienie gazu buforowego dostosowywane jest do stanu wypełnienia katody (...)” – czy robiono pomiary natężenia fluorescencji w funkcji ciśnienia? Czy efekt ciśnieniowy mógł mieć jakiś wpływ na wyniki? Strona 15, drugi akapit, pojawia się zdanie „(...) wybór zbyt długiej stałej czasowej może wpłynąć na kształt rejestrowanych pików” – czy były rozważane inne efekty wpływające na kształt konturów linii widmowych? Strona 16, pierwszy akapit paragrafu 2.2, pojawia się nieprecyzyjne zdanie „Struktura nadsubtelna atomu powstaje w wyniku oddziaływania momentu magnetycznego jądra atomu z momentem magnetycznym chmury atomowej”, gdyż nadsubtelna struktura poziomów energetycznych powstaje w wyniku oddziaływania magnetycznego momentu dipolowego jądra z indukowanym w miejscu jądra polem magnetycznym chmury elektronowej oraz oddziaływania elektrycznego momentu kwadrupolowego jądra z gradientem pola elektrycznego elektronów. Strona 16, opis pod wzorem 1, jest „jądra” powinno być „jądra”. Wzory 2 i 6 zostały zapisane mniejszą czcionką. Strona 17, opis osi x na rysunku 4 – co oznaczają punkty pomiarowe? Strona 17, ostatnie zdanie, pojawia się „zjawisko nasycenia” – na czym ono polega? Strona 18, doktorant pisze „(...) stosunek sygnału do szumu w dalszym ciągu jest niewystarczający (...)” – w jaki sposób oceniano optymalny stosunek sygnału do szumu? Czy analizowano w tym celu jakiś parametr? Dla jakiej wartości indukcji magnetycznej wykonano pomiary pokazane na rysunku 6? Strona 22, drugi akapit, doktorant napisał, że do kalibracji pola magnetycznego wykorzystano linie spektralne argonu – myślę, że z mniejszą niepewnością pomiarową otrzymano by wartości natężenia pola magnetycznego mierząc je teslomierzem. Strona 23, drugi akapit, jest napisane „przy spełnieniu reguł wyboru dla przejść dipolowych” – rozumiem, że doktorant ma tu na myśli przejścia elektryczne dipolowe (E1), a czy istnieje możliwość pomiaru dla przejść multipolowych (M1, E2, M1+E2)? Strona 27, pojawia się nielogiczne zdanie „Na podstawie analizy wyników uzyskanych dla 66 linii spektralnych metodą laserowo indukowanej

fluorescencji, w lampie wyładowczej z katodą wnękową”.

Mam ponadto kilka uwag do samych publikacji. Mają one na celu poprawę czytelności przyszłych artykułów.

Pierwsza uwaga dotyczy zaokrążeń końcowych wyników pomiarów, co jest szczególnie ważne w przypadku tak dużej ilości danych doświadczalnych. Problem dotyczy wszystkich sześciu prac, jednak dla ilustracji przeanalizuję kilka wyników zaprezentowanych w pierwszej złączonej pracy z 2019 roku wylistowanych w tabeli 1. Zaprezentowano w niej m. in. wartości stałych A i B wraz z odpowiednimi niepewnościami. O ile wartości stałych A są prawidłowo zaokrąglone, to zapis części wyników dotyczących stałych B wymaga korekty. Np. w publikacji znajdujemy następujące wyniki podane w MHz, „1747 (78)”, „1258 (88)”, „-2045 (41)”, „3286 (73)”. Czy rzeczywiście jedności w tych niepewnościach mają wpływ na wynik końcowy? Tego typu rezultaty będą bardziej przejrzyste jeśli zapiszemy je w postaci: „1750 (80)”, „1260 (90)”, „-2050 (40)”, „3290 (70)” w MHz lub „1.75 (0.08)”, „1.26 (0.09)”, „-2.05 (0.04)”, „3.29 (0.07)” w GHz.

Kolejne uwagi dotyczą rysunków. Ze względu na kolorystykę zastosowaną na wykresach często miałem trudność z odróżnieniem symulowanych krzywych od danych doświadczalnych. Dobrze byłoby wprowadzić różne kolory i style poszczególnych konturów. Należałoby też ujednoczyć rysunki i konsekwentnie prezentować rezultaty dopasowań przy pomocy krzywych jakości dopasowania, tak jak w przypadku rysunków w pierwszej pracy z 2019 roku. Na niektórych rysunkach widma zajmują co najwyżej połowę dostępnej przestrzeni, a na pozostałej części znajduje się tylko tło. W legendach części rysunków pojawiają się opisy robocze typu „17197pio.dat”, które niewiele mówią czytelnikowi o danym widmie.

Ustawa nakłada na recenzenta obowiązek oceny czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora. Większość młodych osób rozpoczynających swoją przygodę z nauką włącza się w prace badawcze swojego opiekuna naukowego. Nie inaczej było w przypadku mgr. Chomskiego – świadczą o tym przedstawione

oświadczenia. W badaniach prowadzących do powstania trzech pierwszych publikacji jego wkład ograniczył się do pomocy w przygotowaniu układu pomiarowego i pomocy w opracowaniu wyników. W kolejnych pracach jego rola się zmienia i staje się wiodącym współautorem. Na podstawie przedstawionych materiałów nie mogę stwierdzić, czy doktorant brał udział w budowie, bądź modernizacji jakiegokolwiek elementu aparatury. Nie ma też informacji o zaktualizowanych przez niego wersjach oprogramowania użytego do analizy. Tym niemniej, należy stwierdzić, że otrzymanie i przeanalizowanie tak dużej ilości widm wymagało od mgr. inż. M. Chomskiego ogromnej wprawy w obsłudze aparatury, wykonywaniu pomiarów, a później formalnej interpretacji wyników. W ostatnich dwóch pracach cyklu pełni on nawet funkcję autora korespondencyjnego. Chciałbym też zwrócić uwagę na imponujący dorobek publikacyjny doktoranta jak na ten etap kariery naukowej (13 artykułów wg. WoS). Świadczy on o jego pracowitości i ogromnym zaangażowaniu w badania, co bardzo dobrze rokuje na przyszłość. Biorąc powyższe pod uwagę, należy stwierdzić, iż rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez mgr. inż. Macieja Chomskiego.

Zgodnie z punktem pierwszym artykułu 187 Ustawy, należy jeszcze ocenić czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta. Przepis ten jest enigmatyczny i może prowadzić do subiektywnej oceny. Tym bardziej, że prace doktorskie prezentują pewien specjalistyczny przyczynek do wiedzy określonej dyscypliny. Niemniej jednak, analizując poszczególne prace oraz załączony przewodnik należy stwierdzić, że do prowadzenia swoich badań doktorant musiał zdobyć wiedzę teoretyczną z podstaw fizyki atomowej. W szczególności dotyczącą budowy atomów, ich struktury elektronowej oraz zjawisk wpływających na obserwowaną złożoność poziomów energetycznych, a tym samym na złożoność obserwowanych widm. Wykorzystanie zaawansowanych technik spektroskopowych dodatkowo wymagało zgłębienia przez doktoranta wiedzy z optyki, elektryczności, magnetyzmu, technologii konstrukcji źródeł promieniowania elektromagnetycznego, urządzeń próżniowych i elektromagnetycznych oraz technik rejestracji i analizy widm. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr. inż. M. Chomskiego prezentuje jego ogólną wiedzę teoretyczną

i praktyczną z fizyki i spektroskopii. Dodam, że na wyższym poziomie ogólności z pewnością operuje egzamin z dyscypliny podstawowej i to on powinien zweryfikować stan wiedzy doktoranta.

Podsumowując należy zauważyć, iż doktorant prawidłowo zdefiniował główny cel i przedmiot badań, a także twórczo formułował i weryfikował hipotezy badawcze. Miał on wiodący wkład w prace badawcze prowadzące do publikacji 4-6. Cały szereg, w dużej mierze niepublikowanych, danych spektroskopowych otrzymanych w niniejszej pracy stanowi bogatą bazę doświadczalną dla weryfikacji poprawności różnych modeli teoretycznych, a także podstawę do dalszych zastosowań. W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Macieja Chomskiego pt. „Właściwości magnetyczne holmu w stanach wzbudzonych” spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Macieja Chomskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Tomasz Kozłowski