

Warszawa, 21.07.2020r.

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Pisarczyk
Instytut Fizyki Plazmy
i Laserowej Mikrosyntezy
w Warszawie

Recenzja rozprawy doktorskiej

**mgr. Tomasza Jakuba Pięty pt: „*Badania porównawcze plazmy indukowanej laserem z zastosowaniem optycznej spektroskopii emisyjnej i laserowego rozpraszania Thomsona* „
zrealizowanej na**

Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Instytutu Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego - Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie

Praca dotyczy metody LIBS (Laserowo Indukowanej Spektroskopii Emisyjnej, ang.– Laser Induced Breakdown Spectroscopy), która umożliwia efektywne (szybkie) badanie składu chemicznego różnorodnych próbek niezależnie od ich stanów skupienia, wykorzystując do tego celu spektroskopowe metody pomiaru parametrów plazmy ablacyjnej. Polega ona na laserowym odparowaniu niewielkiej ilości badanego materiału-ablacji w przypadku ciał stałych lub przebicia w przypadku ośrodka gazowego i wytworzeniu plazmy emitującej promieniowanie ciągłe oraz liniowe, charakterystyczne dla pierwiastków wchodzących w skład wytworzonej plazmy. Analiza widma liniowego pozwala zidentyfikować pierwiastki emitujące poszczególne linie widmowe. Metoda nie wymaga specjalnego pobierania próbek, ani ich preparowania do badań oraz umożliwia wykonywanie badań *in situ* procesu pomiarowego oraz otrzymywanie wyników w czasie rzeczywistym. Pojedynczy pomiar trwa ułamki sekund. Dlatego, te cechy metody LIBS decydują o jej popularności i szerokim wachlarzu zastosowań umożliwiając wykorzystanie jej w nauce i przemyśle w dziedzinach szeroko rozumianej inżynierii materiałowej. Jest to w zasadzie metoda nieniszcząca, ponieważ pod wpływem ablacji w jednym strzale laserowym zdejmowana jest warstwa o grubości nie przekraczającej 10 μm . Dzięki temu znalazła zastosowanie w badaniach stratygraficznych w renowacji zabytków i dzieł sztuki oraz jako technika pomiarowa do kontroli przebiegu niektórych procesów technologicznych, np. osadzanie warstw, czyszczenie powierzchni, usuwanie nawarstwień itp. Okazała się również przydatna w dziedzinie badań termojądrowych do usuwania zanieczyszczeń zdeponowanych na ściankach komory w tokamakach.

Dotychczasowe badania eksperymentalne i teoretyczne pokazują, że kluczowym problemem w stosowaniu metody LIBS jest wciąż uzyskanie wiarygodnych ilościowych informacji o koncentracji i temperaturze plazmy ablacyjnej, co związane jest z niepewnościami systematycznymi wynikającymi z założenia, że plazma znajduje się w stanie lokalnej równowagi termodynamicznej LRT. Przy takim założeniu, informacje o parametrach plazmy są z zasady niedokładne, gdyż tak prowadzona analiza zakłada *a priori*, że plazma jest jednorodna, stacjonarna i izotermiczna. Dlatego, aby weryfikować założenia o LRT konieczne są przestrzenno-czasowe pomiary wszystkich istotnych parametrów plazmy takich jak: koncentracja elektronowa oraz temperatury: wzbudzeniowa i jonizacyjna plazmy ablacyjnej. W przypadku plazmy o symetrii osiowej informacje radialnych rozkładach koncentracji i temperatury oraz o czasowych zmianach tych rozkładów można uzyskać poprzez transformatę Abela dzięki zastosowaniu do wizualizacji własnego świecenia plazmy kamer CCD z odpowiednią rozdzielczością czasową.

Tematyką badań zrealizowanych w pracy są pomiary porównawcze parametrów plazmy generowanej w symetrii osiowej przy zogniskowaniu wiązki lasera neodymowego w argonie pod ciśnieniem atmosferycznym za pomocą dwóch niezależnych metod diagnostycznych:

- spektroskopii emisyjnej oraz
- laserowego rozpraszania Thomsona,

które umożliwiły dzięki zastosowaniu kamery CCD z czasowym bramkowaniem obrazu, uzyskanie przestrzenno-czasowych informacji o parametrach plazmy ablacyjnej i jej właściwościach stanowiących dane do weryfikacji stanu o LRT.

I. Treść rozprawy - opinie i uwagi na temat poszczególnych rozdziałów pracy.

Pierwsze trzy rozdziały zawierają podstawowe informacje charakteryzujące plazmę laserową, podstawy spektroskopii emisyjnej oraz opis procesów i metod pomiaru koncentracji i temperatury plazmy opartych na oddziaływaniu promieniowania laserowego z plazmą.

W 1 rozdziale przedstawione są: definicja plazmy, procesy atomowe i radiacyjne zachodzące w plazmie oraz najważniejsze modele plazmy w tym model LRT istotny z punktu widzenia interpretacji wyników uzyskanych w pracy.

W 2 rozdziale opisane są metody pomiaru temperatury i koncentracji plazmy oparte na analizie ilościowej widm (linowego i ciągłego) z plazmy ablacyjnej oraz sposób wyznaczania składu chemicznego plazmy – bezkalibracyjną metodą-CFLIBS przy założeniu stanu o LRT. Ponadto, przedstawiony jest sposób abelizacji intensywności emisji linii argonu z plazmy ablacyjnej za pomocą odwrotnej transformaty Abela w celu uzyskania informacji o radialnym jej rozkładzie, niezbędnych do formułowania wniosków odnośnie LRT.

W 3 rozdziale opisane są metody pomiaru parametrów plazmy ablacyjnej oparte na rozproszeniu promieniowania laserowego, ze szczególnym uwzględnieniem metody rozproszenia Thomsona, która jest jedną z głównych z diagnostyk stosowaną w pracy.

Uwagi: Przede wszystkim chciałbym podkreślić, że w/w trzy rozdziały zredagowane na podstawie przeglądu literaturowego zawierają materiał naukowy bardzo przydatny i czytelnie powiązany z interpretacją uzyskanych wyników badań. Materiał ten przedstawiony jest w sposób zrozumiały dla czytelnika. Po stosownych uzupełnieniach może być opublikowany co najmniej jako skrypt dla studentów. Z tego względu należy traktować te rozdziały jako wkład naukowy doktoranta w realizację rozprawy, jednakże nie rozumiem dlaczego przegląd literaturowy został zredagowany wyłącznie na podstawie publikacji dostępnych w literaturze światowej z pominięciem własnych publikacji – co wynika ze spisu literatury rozprawy. W tej kwestii oczekuję wyjaśnień od doktoranta.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały 4 i 5 w których przedstawione są szczegóły zrealizowanych eksperymentów związanych z tematyką pracy. Przedmiotem badań była plazma kreowana w wyniku przebiegu w argonie pod ciśnieniem atmosferycznym pod wpływem impulsu lasera neodymowego o energii maksymalnej 24 mJ i szerokości impulsu 9 ns.

W rozdziale 4 opisane są dwa alternatywne układy spektroskopowe zastosowane do pomiaru parametrów plazmy:

Pierwszy układ pomiarowy bazuje na uzyskaniu informacji o koncentracji i temperaturze elektronowej w plazmie na podstawie widma rozproszonego Thomsona, w którym jako laser

diagnostyczny stosowany był laser neodymowy pracujący na drugie harmonicznej z impulsem nieco krótszym niż laser generujący plazmę.

Drugi układ pomiarowy pozwalał na uzyskanie informacji o rozkładzie przestrzennym parametrów plazmy drogą płaskiego odwzorowania Abela poprzez wizualizację emisji własnej plazmy odpowiadającej wybranym liniom argonu.

Oba układy pomiarowe umożliwiały uzyskanie informacji o widmie rozproszonym oraz emisji plazmy w wybranej chwili czasu za pomocą kamery CCD ze wzmacniaczem obrazu pracującej w reżimie kadrowym.

Uwagi: W/w układy diagnostyczne są wystarczająco zilustrowane i opisane co pozwala zrozumieć ich działanie. Przedstawione szczegóły techniczne dotyczące optycznego zjustowania tych układów i wyboru wymaganych ich parametrów pomiarowych, potwierdzają że doktorant samodzielnie przygotowywał te układy do badań.

W rozdziale 5 przedstawione są wyniki pomiarów zrealizowane dwoma w/w metodami. Przedmiotem analiz ilościowych i interpretacji były obrazy emisji plazmy i odpowiadające im widma rozpraszania zarejestrowane w tych samych warunkach dla 4 wybranych opóźnień w stosunku do maksimum intensywności lasera głównego kreującego badaną plazmę.

W przypadku diagnostyki rozpraszania Thomsona rozkłady koncentracji i temperatury elektronowej w badanym obszarze plazmy i dla wybranych opóźnień, wyznaczono przez dopasowanie uzyskanego rozproszonego widma do funkcji rozpraszania Thomsona odpowiadającej części elektronowej, zgodnie z metodologią opisaną w rozdziale 3 wzór III.32. W dopasowaniu pominięto centralną część widma pochodzącą od jonów, która silnie zaburza sygnał rozpraszania w warunkach eksperymentu.

Dla potrzeb analizy porównawczej pomiary temperatury i koncentracji wykonano dla różnych fluencji lasera sondującego w celu poznania jej wpływu na zwiększoną jonizację dla różnych opóźnień wiązki sondującej i w konsekwencji na niepewność wyznaczenia koncentracji i temperatury elektronowej.

W przypadku koncentracji nie stwierdzono istotnego wzrostu koncentracji z opóźnieniem (w granicach niepewności), natomiast w przypadku pomiaru temperatury stwierdzono wpływ fluencji impulsu laserowego na wyznaczoną temperaturę elektronową w analizowanych czasach ekspansji plazmy. Aby skorygować początkową temperaturę, jej rzeczywistą wartość wyznaczono na podstawie zależności III.46, dopasowując funkcje wzrostu temperatury poprzez ekstrapolację do zerowej wartości fluencji.

Opierając się na uzyskanych danych eksperymentalnych obliczono analityczne zależności opisujące zmiany temperatury i koncentracji elektronowej w funkcji opóźnienia dla wczesnych i późnych czasów ekspansji plazmy. Stwierdzono, że odstępstwa od adiabatycznej ekspansji plazmy dla której zanik zarówno koncentracji jak i temperatury jest szybszy niż obserwowany w eksperymencie wynikają głównie z niesferycznej ekspansji plazmy spowodowanej jej ekspansją w gazie zamiast próżni. Dodatkowo, wpływ na wolniejszy zanik zarówno temperatury jak i koncentracji mają procesy rekombinacji, które są dodatkowym źródłem energii dostarczanej do ekspandującej plazmy.

Uzyskane zależności temperatury i koncentracji elektronowej w funkcji czasu metodą rozpraszania Thomsona porównane zostały z wynikami badań literaturowych uzyskanych przez innych eksperymentatorów. W pracy Merk'a odpowiadającej 169 pozycji literatury oraz pracy Mendys odpowiadającej 102 pozycji w których przedmiotem badań była również plazma argonowa, stwierdzono, że odstępstwa od adiabatycznej sferycznej ekspansji są wyraźnie większe niż w badaniach przedstawionych w rozprawie, jednakże są one zgodne w granicach

niepewności wyznaczonych wartości temperatury i koncentracji. W pracy Harilal pozycja 144, dodatkowo zaobserwowano wolniejszy spadek koncentracji dla obszarów centralnych odpowiadających wczesnej fazie ekspansji. Wolniejsze ochładzanie plazmy w przypadku gazów lżejszych niż argon, potwierdzają również badania opublikowane w pracach: 170, 171, 173. Jedną z nielicznych prac w których obserwowano znacznie szybsze tempo zmniejszania się temperatury i koncentracji jest praca 142, w której do pomiaru koncentracji plazmy stosowano interferometrię.

W przypadku diagnostyki opartej na wizualizacji całego obszaru emisji z plazmy przedmiotem ilościowej analizy były obrazy odpowiadające dwóm liniom plazmy argonowej: Ar I (696,5 nm) oraz Ar II (480,6 nm) uzyskane w takich samych momentach ekspansji jak w przypadku diagnostyki rozproszenia Thomsona. Dzięki abelizacji płaskiego odwzorowania intensywności emisji stosując odwrotną transformatę Abela, uzyskane zostały rozkłady radialne profili tych linii w wybranych przekrojach kreowanej plazmy.

W celu wyznaczenia parametrów linii widmowych takich jak rozszerzenie, przesunięcie i całkowite natężenie, stosowano technikę OSE i odpowiednie dedykowane oprogramowanie. Aby uzyskać te parametry, do wyznaczonych profili linii dopasowano funkcje pseudo-Voigta, uwzględniając zarówno wpływ elektronów jak i jonów prowadzący do asymetrii tych profili.

Temperatury wzbudzeniowe oraz ich niepewność w obszarach przyosiowym i odległym od osi badanej plazmy dla wybranych opóźnień, wyznaczono na podstawie całkowitych natężeń linii widmowych Ar I i Ar II, stosując metodę Boltzmanna opisaną w rozdziale II.5.1. W przypadku małych opóźnień nie stwierdzono jednoznacznie istnienia obszaru plazmy o stałej temperaturze, biorąc pod uwagę rozrzut i niepewność otrzymanych wyników. Dla większych opóźnień w centralnej części plazmy istnieje stabilny rejon o stałej temperaturze, który powiększa się wraz z czasem ekspansji. Ta obserwacja pokrywa się z wnioskami uzyskanymi za pomocą diagnostyki RT, gdzie również dla dużych opóźnień obszar jednorodnej temperatury rozciągał się na odległość do 1,0 mm od osi.

Radialne rozkłady koncentracji elektronów w badanej plazmie zostały wyznaczone na podstawie części lorentzowskiej szerokości połówkowej profili linii argonu stosując metodologię przedstawioną w rozdziale II (zależność II.18), bazującą na dopasowaniu funkcjami pseudo-Voigta. Obliczenia niepewności potwierdziły wpływ temperatury wzbudzeniowej na koncentrację elektronów. W przypadku większych opóźnień rozkłady koncentracji pokrywają się z rozkładami uzyskanym metodą RT, jednakże dla największych opóźnień wartości te są mniejsze niż wyznaczone metodą RT.

Temperaturę jonizacyjną dla dwóch linii argonu oraz wybranych opóźnień, za wyjątkiem największego opóźnienia, wyznaczono metodą Sahy-Boltzmanna (por. II.5.2.), porównując natężenia linii – atomowej i jonowej. Zgodnie z metodologią przedstawioną w rozdziale II (równanie II.24) wymagało to informacji o koncentracji elektronowej, które wzięto z pomiarów uzyskanych metodą RT, oraz uwzględnienia poprawki związanej z obniżeniem energii jonizacji zgodnie z równaniem V.1.

Podsumowaniem pomiarów parametrów plazmy uzyskanych za pomocą metod: OSE oraz rozpraszania RT jest tabela V.2. Porównano średnie wartości koncentracji elektronowej i temperatur (wzbudzeniowej i jonizacyjnej) dla obszaru przyosiowego wraz z ich niepewnościami dla wszystkich rozważanych czasów ekspansji.

Niezgodności między koncentracjami elektronów dla różnych opóźnień, otrzymanymi metodami: RT i OSE autor pracy uzasadnia niedoszacowaniem wpływu rozszerzenia ciśnieniowego na badany profil w przypadku metody RT, co wynika z braku założeń odnośnie stanu plazmy, w przeciwieństwie do metody OSE, gdzie należało przynajmniej częściowo

założyć LRT w celu zastosowania metody Boltzmanna i wyznaczenia temperatury elektronowej, niezbędnej z kolei do wyznaczenia koncentracji elektronowej.

W celu porównania wszystkich wyznaczonych temperatur (elektronowej, wzbudzeniowej oraz jonizacyjnej) dopasowano funkcje analityczne. Z porównania wynika, że zmiany poszczególnych temperatur zachodzą w różnym tempie, a najszybciej z nich maleje temperatura elektronowa. Ponadto dla każdego z badanych opóźnień temperatura jonizacyjna jest dużo niższa, zarówno od temperatury elektronowej jak i wzbudzeniowej uzyskanej na podstawie linii atomowych.

Szczególnie istotną kwestią z punktu widzenia wiarygodności uzyskanych wyników metodą OSE jest ich porównanie z wynikami innych prac. Bezpośrednie porównanie nie było możliwe ze względu na różne warunki pomiarów odnoszące się do wartości fluencji użytych impulsów laserowych, od której w dużym stopniu zależy przebieg ewolucji temperatur i koncentracji elektronów, dlatego dokonano porównania temperatury wzbudzeniowej i koncentracji elektronowej plazmy zlokalizowanej w obszarze przy osiowym uzyskane metodą OSE z wizualizacją przestrzenną dla wybranych czasów ekspansji plazmy z wynikami trzech prac (pozycje 144, 169 i 180) uzyskanych różnymi metodami. Ponadto, wyniki badań eksperymentalnych, porównano z wynikami modelu teoretycznego opisującego stan plazmy w LRT dla różnych ciśnień argonu. Z porównania wynika, że wartość ciśnienia ma istotny wpływ na wiarygodność mierzonych parametrów plazmy.

Podsumowaniem analiz weryfikujących tezę o LRT w oparciu o pomiary porównawcze parametrów plazmy laserowej zrealizowane za pomocą dwóch niezależnych metod diagnostycznych są rozdziały końcowe: V.3 i V.4. Występowanie LRT oceniono w różnych fazach ekspansji plazmy argonowej biorąc pod uwagę dwa podstawowe kryteria: (i) tzw. kryterium McWhirtera na minimalną koncentrację elektronową oraz (ii) kwazi-jednorodność i kwazi-stacjonarność. Dla obszarów przyosiowych warunków McWhirtera jest spełniony dla wczesnych czasów ekspansji w przypadku ArI oraz dla wszystkich czasów w przypadku ArII. Kwazi-stacjonarność oceniono obliczając czas relaksacji, potrzebny do osiągnięcia równowagi wzbudzeniowej i jonizacyjnej. Kwazi-jednorodność oceniono na podstawie względnych zmian koncentracji i temperatury elektronowej na odległościach równych drodze dyfuzji, co pozwoliło jednoznacznie stwierdzić, że w każdym z analizowanych przypadków założenie o kwazi-jednorodności plazmy jest słuszne, zarówno dla jonów jak i atomów.

W ostatnim paragrafie V.4 analizowany jest wpływ wiązki diagnostycznej na zaburzenie stanu plazmy w obszarze wzdłuż kierunku sondowania. Stwierdzono wzrost jonizacji plazmy (odnoszącej się do obsadzeń jonów i atomów) ze zwiększeniem fluencji lasera diagnostycznego oraz zmniejszeniem opóźnienia. Wzrost fluencji, przy odpowiednio wysokiej koncentracji elektronów, prowadzi do wyraźnego wzrostu temperatury elektronowej.

Ponadto, symulacje widm RT potwierdziły zwiększoną jonizację plazmy będącą wynikiem wzrostu koncentracji elektronów w trakcie oddziaływania plazmy z impulsem laserowym, co jest zgodne z wnioskiem sformułowanym na podstawie pomiarów widm emisyjnych. Badania wpływu wiązki diagnostycznej na zaburzenie stanu plazmy pozwoliły dokonać odpowiednich korekt co do rzeczywistej temperatury elektronowej w plazmie i określić poziom fluencji impulsu lasera poniżej którego można uważać metodę RT jako nieinwazyjną.

Uwagi: Wysoko oceniam przedstawione wyniki badań porównawczych za pomocą kompleksowego układu pomiarowego. Wyniki każdej z diagnostyk są bardzo szczegółowo przeanalizowane i zinterpretowane biorąc pod uwagę podobne eksperymenty opisane w dostępnej literaturze światowej.

Jednakże, mam pewien niedosyt informacji odnośnie analizy ilościowej wyników pomiarów opartej na wykorzystaniu transformaty Abela w celu uzyskania informacji o rozkładach radialnych koncentracji i temperatury w badanej plazmie – zwłaszcza, że to podejście w opinii doktoranta jest w dużym stopniu nowatorskim. Doktorant w tym celu wykorzystuje oprogramowanie autorstwa prof. Pokrzywki (opisane w dodatku A), koncentrując się głównie na manualnej jego obsłudze, zamiast na szczegółach metody numerycznego rozwiązania Abela i jej wyboru do analizy uzyskanych wyników. Brakuje przede wszystkim informacji, dlaczego z pośród wielu metod numerycznego rozwiązania równania Abela (interpolacyjnych i średniokwadratowych) została wybrana metoda opisana w dodatku A. Wybór odpowiedniej metody numerycznego rozwiązania jest kluczowym z punktu widzenia wiarygodności uzyskanych rozkładów koncentracji i temperatury. W mojej opinii zastosowanie do rozwiązania równania Abela szybkiej transformaty Fouriera (FFT) byłoby lepszym podejściem, ponieważ usuwa problem wyznaczenia granicy badanej plazmy, o którym mowa w opisie oprogramowania.

W związku z powyższym w kwestii uzasadnienia wyboru metody rozwiązania stosowanej w rozprawie, oczekuję od doktoranta wyjaśnień na obronie.

II. Ocena osiągnięć związanych z realizacją rozprawy.

Biorąc pod uwagę treść rozprawy osiągnięcia związane z realizacją badań mają zarówno techniczny jak i naukowy charakter.

Wymiernym wkładem doktoranta w zakresie technicznej strony przygotowania i realizacji badań są:

- opracowanie koncepcji przeprowadzenia badań biorąc pod uwagę cele badawcze do osiągnięcia i weryfikację tezy o LRT,
- zestawienie dwóch alternatywnych układów diagnostycznych do pomiaru koncentracji i temperatury plazmy kreowanej w argonie, z których jeden bazuje na rejestracji widm RT, natomiast drugi na 2D wizualizacji emisji własnej plazmy opartej na technice OSE, przy czym należy zaznaczyć, że ten ostatni układ pomiarowy jest w dużym stopniu unikalny, ponieważ umożliwia uzyskanie informacji o przestrzenno-czasowych rozkładach koncentracji i temperatury elektronowej w plazmie,
- obsługa w/w układów spektroskopowych w czasie sesji pomiarowych, zapisywanie danych, kontrolowanie na bieżąco poprawności zjustowania tych układów oraz warunków rejestracji w celu uzyskania dobrej jakości obrazów.

Wkład o charakterze naukowym dotyczy:

- przeglądu literaturowego zawierającego informacje z zakresu podstaw spektroskopii emisyjnej oraz metod pomiaru koncentracji i temperatury plazmy opartych na oddziaływaniu promieniowania laserowego z plazmą niezbędne do opracowania stosowanych metodologii do analizy danych z przeprowadzonych eksperymentów,
- opracowania metodologii i dedykowanego oprogramowania do ilościowej analizy danych uzyskanych za pomocą 2 układów diagnostycznych, w celu uzyskania informacji o rozkładach temperatury i koncentracji w plazmie argonowej,
- ilościowej analizy danych eksperymentalnych i ich symulacji w celu uzyskania informacji o rozkładach koncentracji i temperaturze plazmy argonowej niezbędnych do weryfikacji tezy o LRT, istotnej z punktu widzenia zastosowań metody LIBS,
- interpretacji i analizy uzyskanych wyników badań w odniesieniu do danych literaturowych i sformułowanie wniosków końcowych weryfikujących tezę o LRT.

Przechodząc do oceny osiągnięć doktoranta, chciałbym podkreślić, że nie mam istotnych uwag merytorycznych do zrealizowanych badań i sformułowanych na ich podstawie wniosków. Mimo, iż większa część pracy jest przeglądem literaturowym poświęconym zagadnieniom dotyczącym podstaw fizyki i metodom pomiaru parametrów plazmy metodami spektroskopii laserowej (co wynika ze spisu treści pracy), to w kontekście zrealizowanych badań taki układ pracy wydaje się uzasadniony, żeby zrozumieć uzyskane wyniki pomiarów za pomocą dwóch w/w diagnostyk, oraz ich interpretację, nie tylko przez doświadczonych eksperymentatorów, ale również przez młodych pracowników naukowych w tym studentów i doktorantów interesujących się fizyką plazmy laserowej. Należy podkreślić bardzo czytelne powiązanie uzyskanych wyników badań z wiedzą literaturową w szczególności z wzorami i danymi z innych opublikowanych eksperymentów.

Jako ważne osiągnięcie o charakterze naukowo technicznym uważam uruchomienie unikalnego kompleksowego układu spektroskopowego do pomiaru przestrzenno-czasowych parametrów plazmy kreowanej w argonie na podstawie 2D wizualizacji emisji wybranych linii widmowych stosując w tym celu odwrotną transformatę Abela. Zbudowany kompleks diagnostyczny stwarza nowe możliwości w rozwijaniu metody LIBS do różnych zastosowań.

Ponadto, praca jest perfekcyjnie zredagowana, biorąc pod uwagę zarówno zrozumienie tekstu jak i ilustracje. Znalazłem tylko jedną pomyłkę literową na stronie 99 (w 12 linii od dołu powinno być: „Natomiaszt” zamiast Natomist”).

Jednakże, pewnym niedociągnięciem przedłożonej rozprawy jest brak informacji o publikacji uzyskanych wyników badań w dostępnej literaturze oraz prezentacji tych wyników na konferencjach naukowych, zarówno krajowych jak i zagranicznych. Co więcej, w spisie literatury brak jest również prac powiązanych z rozprawą, których współautorem jest autor rozprawy. Brak tych informacji nie pozwala mi ocenić na ile w/w osiągnięcia są kontynuacją dotychczasowego dorobku naukowego doktoranta, co niewątpliwie ma pewien wpływ na końcową ocenę rozprawy. Jedyną pozycją, powiązaną z rozprawą jest praca [174] w spisie literatury, która dotyczy inwersji Abela w zastosowaniu do rekonstrukcji linii widmowych rejestrowanych techniką OSE, jednakże autorem tej pracy jest Pan prof. Pokrzywka, którego oprogramowanie było wykorzystywane do abelizacji wyników badań prezentowanych w pracy.

W związku z powyższym zwracam się do doktoranta, żeby podczas obrony:

- przedstawił swój dotychczasowy dorobek naukowy, ze szczególnym uwzględnieniem dorobku związanego z tematyką pracy, oraz
- skomentował wybór metody numerycznego rozwiązania równania Abela do analizy wyników badań w rozprawie.

III. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę w/w osiągnięcia związane z tematyką rozprawy uważam, że doktorant zrealizował cele rozprawy i osiągnął zamierzoną tezę.

Uzasadniając taką ocenę, stwierdzam, że uzyskany materiał naukowy stanowi wymierny wkład w uzupełnienie dotychczasowej wiedzy w zakresie wykorzystania metody LIBS do różnych zastosowań. W/w niedociągnięcia nie mają istotnego wpływu na bardzo pozytywną ocenę.

W związku z powyższym pracę oceniam na bardzo dobrze, jednocześnie uzależniając jej wyróżnienie od wyjaśnień doktoranta podczas obrony.

Podsumowując recenzję stwierdzam, że przedstawiona przez mgr. Tomasza Jakuba Piętę rozprawa doktorska pt. *"Badania porównawcze plazmy indukowanej laserem z zastosowaniem optycznej spektroskopii emisyjnej i laserowego rozpraszania Thomsona"*, spełnia wszystkie wymagania merytoryczne i formalne wynikające z obowiązujących obecnie przepisów o stopniach naukowych, dlatego wnioskuję o dopuszczanie jej do publicznej obrony.

