

Warszawa, 29.06.2023 r.

dr hab. Monika Kubkowska, prof. IFPiLM
Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy
ul. Hery 23
01-497 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Franciszka Sobczuka
z tytułem *Dwukolorowe rozpraszanie światła laserowego w diagnostyce
plazmy generowanej laserowo***

Przedstawiona do recenzji praca Pana mgr. Franciszka Sobczuka pt. *Dwukolorowe rozpraszanie światła laserowego w diagnostyce plazmy generowanej laserowo*, napisana pod opieką dr. hab. Krzysztofa Dzierżęgi, prof. Uniwersytetu Jagiellońskiego, dotyczy rozwoju techniki dwukolorowego rozpraszania światła laserowego w diagnostyce plazmy generowanej laserowo w gazach. Celem badań była analiza zarejestrowanych widm na podstawie modeli rozpraszania Rayleigha i Thomsona, a następnie pomiar koncentracji i temperatury elektronów, temperatury jonowej oraz koncentracji atomów w stanie podstawowym i w stanach wzbudzonych, aby określić, czy badana plazma znajduje się w stanie lokalnej równowagi termodynamicznej, LTE. W pracy wykorzystano dostępne w literaturze lub obliczone z zasad pierwszych różniczkowe przekroje czynne na różne procesy rozpraszania. Realizacja głównych celów dysertacji wymagała zbudowania układu eksperymentalnego z wykorzystaniem układu spektrometru siatkowego i kamery iCCD oraz układu interferometrycznego opartego na etalonie Fabry’ego–Pérot. Dodatkowo, w układzie rejestrującym światło rozproszone umieszczony został optyczny wzmacniacz parametryczny, którego zadaniem było zwiększenie stosunku sygnału do szumu.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim, liczy 124 strony, składa się z wprowadzenia i motywacji oraz czterech głównych rozdziałów, z których ostatni stanowi podsumowanie i wnioski. Praca poprzedzona została wykazem skrótów i symboli matematycznych. Bibliografia zawiera odnośniki do 103 pozycji literaturowych.

Na wstępie Autor dokonał wprowadzenia do przeprowadzonych badań, zdefiniował zastosowaną metodę plazmy indukowanej laserowo i spektroskopię światła rozproszonego. Przedstawił zastosowanie użytej metody w badaniach różnego rodzaju plazm, od rzadkich po gęste, jak i od chłodnych po gorące. Autor zwraca także uwagę na to, że spektroskopia laserowa światła rozproszonego jest jedną z najbardziej wiarygodnych metod wyznaczania temperatury elektronowej w badaniach plazmy w urządzeniach termojądrowych. Ja również wymieniałabym tę metodę do wyznaczania koncentracji elektronowej. W rozdziale tym mgr Sobczuk zawarł też motywację swoich badań, mianowicie przeprowadzenie kompleksowej diagnostyki plazmy, w tym cząstek naładowanych i neutralnych poprzez odróżnienie w mierzonym sygnale przyczynku rozpraszania Thomsona od Rayleigha.

W Rozdziale 1 zatytułowanym „Plazma generowana laserowo” Autor zdefiniował pojęcie plazmy oraz podstawowe jej parametry. Opisał stany równowagi termodynamicznej plazmy, które mają następnie znaczenie dla wyznaczanych parametrów. W tej części znajdują

się również mechanizmy generowania plazmy indukowanej laserowo wraz z metodami diagnostycznymi.

W Rozdziale 2 Autor dokonał przeglądu modeli procesów rozpraszania światła laserowego na ośrodku plazmowym. W dwóch podrozdziałach opisał szczegółowo zjawisko rozpraszania Rayleigha i Thomsona.

W pierwszym z nich zostały zebrane wartości referencyjnych przekrojów czynnych na rozpraszanie Rayleigha używane w pracy, wartości współczynników transportu dla różnych gazów wykorzystywane następnie do symulacji funkcji gęstości spektralnej na rozpraszanie Rayleigha-Brillouina. W przypadku helu Autor zdecydował o użyciu teoretycznej wartości statycznej polaryzowalności i wskazanej formuły, przy czym stwierdza, że wyznaczona niepewność może być zaniżona ze względu na pominięcie efektów rezonansowych. Interesujące byłoby oszacowanie lub wyjaśnienie, jak duże może być zniżenie tej wartości? W tej części dysertacji mgr Sobczuk przedstawia funkcje gęstości spektralnej, zaczynając od przedstawienia składowych występujących w widmie światła rozproszonego na sposób Rayleigha. Bardzo szczegółowo dokonuje opisu sposobów wyznaczania tej funkcji poprzez zastosowanie różnych modeli. W tym miejscu przytacza wartości współczynników transportu dla różnych gazów wykorzystywane do przeprowadzenia przez Autora symulacji. Na koniec podrozdziału dotyczącego rozpraszania Rayleigha mgr Sobczuk stwierdza, że przedstawione wartości przekrojów czynnych dla różnych długości fali są w jego ocenie najbardziej wiarygodne spośród tych dostępnych w literaturze. Uważam takie stwierdzenie za słuszne, w szczególności po przeprowadzeniu wcześniejszej analizy i obliczeń. Warto zauważyć, że Autor bardzo krytycznie ocenia to podejście i ma świadomość, że niepewność przekrojów czynnych na rozpraszanie Rayleigha ma główny wpływ na parametry termodynamiczne plazmy uzyskane z eksperymentu z wykorzystaniem spektroskopii laserowej. Dlatego też wskazuje potrzebę dalszej weryfikacji tych wartości.

W drugim podrozdziale Autor skupia się na opisie rozpraszania Thomsona i założeniach w celu wyznaczenia najpierw różniczkowego przekroju czynnego, a następnie funkcji gęstości spektralnej wraz z parametrem rozpraszania. Podkreśla tu istotę wartości temperatury elektronowej i jonowej, które mają wpływ na określenie stanu równowagi termodynamicznej. W tej części pracy znajduje się opis widma eksperymentalnego i skonstruowany przez mgr. Sobczuka model uwzględniający przejściowy charakter i niejednorodności plazmy, jak również zmienność jej parametrów od impulsu do impulsu laserowego. Fenomenologiczne podejście wprowadzone przez Autora pozwoliło zasymulować widma, uwzględniając te niejednorodności plazmy, niezerowy kąt bryłowy, z którego pochodzi obserwowane światło, oraz funkcję aparaturową. Na rys. 2.19, który przedstawia wysymulowane rzeczywiste widma światła rozproszonego dla dwóch różnych długości fali, dobrze byłoby zaznaczyć, który rysunek odpowiada jakiej długości fali lasera próbującego – domyślam się, że górny 355 nm, natomiast dolny 532 nm.

Warto dodać, że Autor do opisanych w pracy badań stosował środowisko Wolfram Mathematica, co pozwoliło na stworzenie biblioteki zawierającej funkcje opisujące procesy rozpraszania. W rozdziale tym pojawiają się liczne wzory związane z rozpraszaniem, niemniej jednak nie zawsze Autor dokonuje opisu występujących w nich symboli, np. równanie 2.48 – brak opisu Z . Ponadto, wskazane byłoby (tam, gdzie to możliwe) podać jednostki, jakim

odpowiadają dane wzory (np. przy opisie szerokości połówkowej czy funkcji gęstości spektralnej). Dobrze, że jednostki widnieją na części przedstawionych wykresów.

Rozdział 3 dysertacji Pana mgr. Sobczuka zawiera opis przeprowadzonych eksperymentów i analizę uzyskanych wyników.

Pierwszy podrozdział dotyczy badań plazmy metodą dwukolorowego rozpraszania światła laserowego w celu diagnostyki plazmy w wodorze. Opisana metoda opiera się na wyznaczaniu parametrów plazmy na podstawie całkowitego natężenia światła rozproszonego oraz właściwości spektralnych części elektronowej zmierzonego widma światła. Układ eksperymentalny opisany został z dużą dokładnością i można w nim znaleźć szczegóły każdego elementu optycznego. Wyniki pomiarów zostały uśrednione po 30 000 – 60 000 impulsów laserowych. Warto byłoby dodać, co było przesłanką, że dany pomiar wymagał tylko 30 000 impulsów, a inny 60 000. Być może 30 000 impulsów odnosi się do wiązki próbkującej 355 nm, której energia wynosiła 3 mJ, a 60 000 impulsów do wiązki o niższej energii 1 mJ, jednak nie jest to jasno napisane. Dodatkowo, interesujące jest ile wynosi niepewność energii wiązek próbkujących.

W celu ograniczenia liczby zmiennych do symulacji sygnałów światła rozproszonego Autor przeprowadził badania składu plazmy wodorowej z wykorzystaniem programu NASA CEA, który dla danej temperatury elektronowej i ciśnienia panującego w plazmie generuje całkowite koncentracje molekuł i atomów oraz koncentracje elektronową plazmy. Wyniki zaprezentowane na rys. 3.3 pokazują, że pomiar depolaryzacji światła rozproszonego może zostać wykorzystany do wyznaczenia temperatury plazmy. Autor dokonał następnie wyliczenia wartości parametru rozpraszania oraz natężenia światła rozproszonego na cząstkach neutralnych i elektronach, co zaprezentował na rys. 3.4.

W dalszej części mgr Sobczuk przechodzi do opisu wyników i opracowania danych eksperymentalnych. Na rys. 3.5 jest błąd w opisie górnego panelu. Rysunek opisuje obrazy widm rozpraszania światła laserowego zarejestrowane dla różnych opóźnień impulsu próbkującego względem impulsu generującego plazmę, zaczynając od 120 ns, poprzez 250 ns, 500 ns do 1200 ns. Autor wykorzystując wyniki wcześniej przeprowadzonych symulacji, które pozwoliły na dokonanie pewnych założeń, wprowadza funkcję znormalizowaną do sygnału referencyjnego, aby odwzorować zmierzone eksperymentalnie widmo światła rozproszonego. W celu dopasowania funkcji do sygnału stworzył program napisany w języku C, który wykorzystał w pierwszym kroku, zakładając brak niestabilności i niejednorodności plazmy, a następnie je uwzględniając. Rys. 3.6 przedstawia wyniki obliczeń. Interesujące byłoby skomentowanie dopasowania i wyjaśnienie, dlaczego funkcja zakładająca brak niestabilności i niejednorodności dobrze odzwierciedla okolice maksimów w widmie rozpraszania światła, a już gorzej skrzydła tego widma, natomiast funkcja uwzględniająca te niejednorodności lepiej odwzorowuje sam kształt widma. Jaki ma wpływ długość fali wiązki próbkującej na wynik? Dopasowania wydają się lepsze dla 532 nm. Na rys. 3.7 Autor prezentuje rozkłady przestrzenne temperatury elektronowej i średniej koncentracji elektronowej wzdłuż osi wiązki próbkującej. Warto byłoby dodać komentarz wyjaśniający, z czego wynikają duże błędy w niektórych przypadkach w wartościach temperatury dla opóźnienia 1200 ns? Czy ze zbyt słabego światła dla tego opóźnienia?

W dalszej części dysertacji Autor rozważa dwa przypadki w celu wyznaczenia temperatury jonowej i koncentracji atomów wodoru, zakładając plazmę dwutemperaturową, a

więc taką, w której temperatura elektronowa jest różna od temperatury jonowej oraz plazmę, w której obie temperatury są sobie równe. W pierwszym przypadku okazuje się, że dla małego opóźnienia wiązki próbkującej temperatura jonowa może być istotnie wyższa od elektronowej, co zostało przedstawione na rys. 3.10. Jest to przesłanką do tego, że plazma w początkowej fazie nie znajduje się jeszcze w stanie równowagi termodynamicznej, LTE. Dla opóźnienia 250 ns i 500 ns rozkłady temperatury jonowej wykazują niesymetryczne rozłożenie wzdłuż osi wiązki próbkującej. Czy wiadomo, co jest tego powodem? Mgr Sobczuk krytycznie komentuje uzyskane wyniki, jawnie opisuje, że w niektórych obszarach plazmy uzyskał niefizyczne (ujemne) koncentracje, szuka wyjaśnienia i zdaje sobie sprawę z potrzeby dalszych prac eksperymentalnych.

Autor w podsumowaniu tej części dysertacji przedstawia, że metoda dwukolorowego rozpraszania światła laserowego daje możliwości wyznaczenia podstawowych parametrów plazmy, takich jak temperatura i koncentracja elektronowa, koncentracja atomów wodoru, atomów wodoru w stanach wzbudzonych i temperatura jonowa, a co za tym idzie – możliwość zbadania stanu równowagi termodynamicznej plazmy. Parametry te wyznaczone zostały na podstawie całkowitego natężenia światła rozproszonego oraz właściwości spektralnych części elektronowej widma. Ze względu na to, że opisane wyniki bazują na literaturowych przekrojach czynnych na rozpraszanie Rayleigha, są one często obarczone dużymi niepewnościami. Wszystko to stało się motywacją do badań zaprezentowanych w podrozdziale 3.2, w którym zastosowany został układ do spektroskopii o wysokiej zdolności rozdzielczej i czułości. Warto dodać, że część tego układu została zbudowana i wykorzystana w pracy magisterskiej Autora.

Podrozdział 3.2 dotyczy badań plazmy w azocie w celu wyznaczenia parametrów plazmy. Tym razem Autor skupia się na środkowej części widma, na którą składają się widma części jonowej rozpraszania Thomsona oraz Rayleigha, w których to zawarte są dodatkowe informacje o warunkach panujących w plazmie. Ze względu na bardzo niski sygnał światła rozproszonego mgr Sobczuk zdecydował się zastosować optyczny wzmacniacz parametryczny przed skierowaniem światła na etalon. Przegląd literatury wykonany przez Autora wskazuje, że takie rozwiązanie nie zostało wcześniej zastosowane w eksperymentach z rozpraszaniem Thomsona. Właściwości zbudowanego wzmacniacza zostały bardzo dobrze zbadane, co zostało zaprezentowane na rys. 3.17 i w tabeli 3.2. Odległość pomiędzy wzmacniaczem a fotopowielaczem została również dobrana optymalnie, tak, aby zapewnić możliwie jak największy stosunek wzmocnionego sygnału do tła. Opis układu eksperymentalnego do pomiarów z wysoką spektralną zdolnością rozdzielczą i czułością został również dobrze i szczegółowo opisany, jak ten we wcześniejszym rozdziale. Badania dotyczyły plazmy generowanej laserowo w gazowym azocie pod ciśnieniem 1000 mbar. Czy był jakiś powód wyboru akurat takiego ciśnienia?

Pan mgr Sobczuk w tej części pracy dokonuje podobnej jak dla plazmy wodorowej analizy, prezentując znormalizowane widma rozpraszania światła laserowego na plazmie, całkowite znormalizowane natężenie tego światła oraz funkcje dopasowania do danych eksperymentalnych dla opóźnień 150 ns, 200 ns i 300 ns. Na tej podstawie wyznacza rozkłady przestrzenne koncentracji i temperatury elektronowej. Autor sam zauważa, że rozkład przestrzenny koncentracji elektronów wykazuje minimum w centralnym obszarze plazmy, jednak pozostawia to bez wyjaśnienia. Warto byłoby skomentować uzyskany wynik.

Wyczerpująco opisana została procedura opracowania interferogramów i metody dekonwolucji. W rezultacie przeprowadzonej analizy Autorowi udało się wyznaczyć wartości temperatury i koncentracji elektronowej, temperatury jonowej oraz wartość średniego ładunku jonu dla centralnego, jednorodnego obszaru plazmy generowanej poprzez przebiecie laserowe w azocie. Uzyskane wartości maleją wraz z czasem. Co ciekawe, pomimo zgodności, w ramach niepewności, temperatury jonowej i elektronowej, to jednak wartość temperatury jonowej wraz z ewolucją plazmy (dla opóźnienia 200 ns i 300 ns) nieco przewyższały temperaturę elektronową. Niemniej jednak, jak zauważa sam Autor, nie ma podstaw, by sądzić, że plazma nie znajduje się w stanie równowagi termodynamicznej.

Chciałabym podkreślić, że mgr Sobczuk uczestniczył w badaniach stojących na wysokim poziomie merytorycznym i instrumentalnym, podczas których zdobył doświadczenie eksperymentatora. W celu uzyskania potrzebnej spektralnej zdolności rozdzielczej zbudował skrzyżowany układ optycznego wzmacniacza parametrycznego i etalonu Fabry'ego-Pérot. Dokonał względnej kalibracji natężenia światła rozproszonego na ośrodku plazmowym. Przygotowanie układu eksperymentalnego do opisanych w dysertacji badań wymagało od Autora zgłębienia wiedzy z dziedziny optyki i mechaniki. Zbudowany przez mgr Sobczuka układ pozwolił na skrócenie pojedynczego pomiaru z kilkudziesięciu godzin do kilkudziesięciu minut, co ma ogromne znaczenie, biorąc pod uwagę stabilność pracy układów laserowych. Omówione w niniejszej dysertacji wyniki zostały również zaprezentowane w artykułach naukowych, które znajdują się w wykazie bibliografii.

Rozprawa doktorska Pana mgr. Sobczuka nie jest wolna od błędów interpunkcyjnych czy drobnych literówek. Poniżej kilka z nich:

- w Rozdziale 1, w zdaniu: „Jednakże, po upływie kilku mikrosekund od impulsu generującego plazmę, koncentracja elektronów spada o kilka rzędów wielkości a temperatura elektronowa osiąga wartość kilku tysięcy kelwinów” – po wyrażeniu „o kilka rzędów wielkości” powinien być przecinek, natomiast skala wyrażona w stopniach Kelvina powinna być napisana wielką literą.
- W drugim akapicie Rozdziału 2, w drugim zdaniu powinno być: „Modele te pozwoliły na skompletowanie zestawu stałych”, a nie „zestawy”. Z kolei w ostatnim zdaniu tego akapitu: „Przygotowaną bibliotekę, wraz z dokumentacją...” należy usunąć przecinek po słowie „bibliotekę”.
- W podrozdziale 2.1.3, w pierwszym akapicie, w trzecim zdaniu należy postawić przecinek przed zwrotem „w którym”: „Dla uproszczenia procedury pomiarowej, gazem takim był zawsze ten sam gaz w którym generowana była plazma”.
- W podpisie rysunku 2.4 należy usunąć przecinek przed wyrazem „lub”: „...a gaz znajduje się pod ciśnieniem 1 bar, 2 bar lub 5 bar...”. Podobny błąd występuje w podpisie rys. 2.5.
- W rozdziale 2.1.5 w ostatnim zdaniu przed rysunkiem 2.9 wkradł się symbol wykrzyknika: „..., zarówno teoretyczna jak i eksperymentalna”.
- W ostatnim zdaniu podrozdziału 3.1.3 jest błąd w słowie „ewentualny”: „Tak duża liczba średniowanych impulsów wynikała z bardzo małej energii impulsu próbkującego dobranej tak, aby zminimalizować ewentualny wpływ impulsu próbkującego na stan plazmy”.
- W zdaniu poprzedzającym równanie 3.47 brakuje „a” w wyrazie „wzmacniacz”: „Jeżeli wiązka pompująca wzmacniacz ma promień w_p i charakteryzuje się czasem trwania impulsu...”.

- Na stronie 88 w zdaniu zaczynającym się od: „Światło pochodzące z tego procesu, i stanowiące główne źródło szumu fotonowego, ...” nie powinno być przecinka przed „i”.
- W podpisie rys. 3.22 w słowie „danych” zamieniona jest kolejność liter „danych”.
- W trzecim zdaniu rozdziału 3.2.6 nie powinno być nawiasów przy numerze rysunku 3.23. Natomiast w kolejnym zdaniu brakuje litery „k” w słowie „elektronowa”. W tym samym rozdziale w dalszej części jest błędnie napisane odniesienie do lasera próbującego: „Oznacza to, że w tym przypadku ma miejsce wzbudzenie stanów powiązanych z tymi liniami przez impuls laserowa próbującego”.
- Na stronie 106 w zdaniu: „Widma rozpraszania światła laserowego na plazmie, i gazie referencyjnym...” nie powinno być przecinka przed „i”.

Mgr Sobczuk w wielu miejscach pracy wykorzystuje środowisko Mathematica do tworzenia skryptów, a także rozwija program w języku C, w celu analizy danych eksperymentalnych. Przedstawiona praca prezentuje zarówno ogólną wiedzę teoretyczną Autora, jak i jej praktyczne wykorzystanie w opisanych badaniach. Oryginalnym rozwiązaniem jest wprowadzenie splotu funkcji gęstości spektralnej z rozkładem Gaussa koncentracji elektronowej do analizy widm rozpraszania Thomsona. Metoda ta była wykorzystana w badaniach profili Starka linii He II Paschen-alfa, a uzyskane wyniki zostały opisane przez Autora w pracy opublikowanej w Physical Review E. W tym samym czasopiśmie, w kolejnym artykule, opisane zostało wykorzystanie wyznaczonych eksperymentalnie parametrów plazmy do weryfikacji symulacji komputerowych widm emisyjnych linii wodoru serii Balmera. Dzięki krytycznemu podejściu do uzyskanych danych i zgłębieniu literatury praca prezentuje wyniki, które mają istotne znaczenie naukowe i są podstawą do rozwijania modeli teoretycznych, a także dalszych weryfikacji eksperymentalnych.

Podsumowując, rozprawa mgr. Franciszka Sobczuka w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Milubowate