

Warszawa, 28.06.2023r.

dr hab. inż. Andrzej Bartnik  
Instytut Optoelektroniki  
Wojskowa Akademia Techniczna  
gen. Sylwestra Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Franciszka Sobczuka pt.:**  
**Dwukolorowe rozpraszanie światła laserowego w diagnostyce plazmy generowanej**  
**laserowo**

Rozprawa doktorska mgr Franciszka Sobczuka dotyczy pomiarów parametrów termodynamicznych plazmy laserowej w oparciu o efekty rozpraszania promieniowania laserowego. Aczkolwiek sama idea wykorzystania rozpraszania Thomsona do wyznaczenia parametrów plazmy jest jasna, problemem jest jej zastosowanie w rzeczywistych układach pomiarowych, gdzie nakładają się na siebie widma związane z różnymi typami rozpraszania, rejestrowany sygnał jest słaby, wymagana jest wysoka rozdzielczość spektralna a sondujący impuls laserowy może wpływać na parametry plazmy. Autor pracy starannie przeanalizował wpływ tych czynników na rejestrowane rozkłady widmowe, zebrał różnego typu dane literaturowe potrzebne do wyznaczenia przekrojów czynnych na rozpraszanie Rayleigha czy Thomsona, wyliczył i przedstawił na wykresach różniczkowe przekroje czynne dla różnych przypadków rozpraszania. Rozpatrzył przypadki rozpraszania Thomsona dla różnych rozkładów prędkości elektronów, wyznaczył funkcje gęstości spektralnej dla tych rozkładów. Następnie opracował układy pomiarowe do diagnostyki plazmy metodą 2CLS oraz metodą rozpraszania światła laserowego z użyciem optycznego wzmacniacza parametrycznego i etalonu Fabry – Perota. Za pomocą tych układów wykonał odpowiednie pomiary i przedstawił opracowane wyniki.

Rozprawa zawiera cztery rozdziały. Pierwszy rozdział poświęcony jest wytwarzaniu plazmy indukowanej impulsem laserowym, w którym autor przedstawił podstawowe informacje na temat plazmy, krótko opisał stany równowagi termodynamicznej: pełnej i lokalnej. Krótko opisał też wytwarzanie i ewolucję plazmy laserowej.

Rozdział drugi poświęcony jest mechanizmom rozpraszania promieniowania elektromagnetycznego w plazmie. Na podstawie danych literaturowych opisał szczegółowo rozpraszanie Rayleigha na cząstkach sferycznie symetrycznych oraz na molekułach. W rozdziale tym przedstawił też wartości i rozkłady różniczkowych przekrojów czynnych na rozpraszanie Rayleigha na molekułach dwuatomowych. Przedstawił też wykresy przekrojów czynnych na rozpraszanie Rayleigha na atomie wodoru dla stanów o różnych wartościach głównej liczby kwantowej i odpowiednie zależności w funkcji długości fali. W dalszej części opisał rozpraszanie Thomsona, przedstawił wykresy funkcji gęstości spektralnej odpowiadające różnym rozkładom prędkości elektronów. Przedstawił też wykresy funkcji gęstości spektralnej dla rozpraszania Thomsona, wyznaczone dla plazmy wodorowej,

charakteryzującej się różnymi wartościami parametrów termodynamicznych. Zaprezentował też wyniki symulacji widm światła rozproszonego dla dwóch długości fal z uwzględnieniem efektów aparaturowych oraz ideę metody dwukolorowego rozpraszania laserowego.

W rozdziale trzecim opisany został schemat układu eksperymentalnego do diagnostyki plazmy metodą dwukolorowego rozpraszania światła. Układ ten umożliwił wyznaczenie koncentracji elektronów i ich temperatury. Oprócz tego możliwe było wyznaczenie temperatury jonowej oraz koncentracji cząstek neutralnych w plazmie wodorowej. Autor wykorzystał w swoich badaniach istniejący układ do diagnostyki plazmy metodą rozpraszania Thomsona zbudowany i wykorzystywany w Laboratorium Diagnostyki Plazmy Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Wprowadzona przez niego modyfikacja polegała na uzupełnieniu układu lasera sondującego o generator trzeciej harmonicznej. W rozdziale tym autor przedstawił obrazy widm rozproszonego światła laserowego w plazmie wodorowej, zarejestrowane dla czterech różnych opóźnień impulsu lasera sondującego względem impulsu lasera do wytwarzania plazmy. Dalej przedstawił opracowane wyniki pomiarów. Zaprezentował wyniki dopasowania funkcji gęstości spektralnej do danych eksperymentalnych, rozkłady koncentracji i temperatury elektronowej, temperatury jonowej a także koncentracji atomów w stanie podstawowym i stanach wzbudzonych. Pokazał też wpływ energii impulsu sondującego na koncentrację i temperaturę elektronową.

W rozdziale trzecim autor przedstawił też układ pomiarowy z zastosowaniem optycznego wzmacniacza parametrycznego i etalonu Fabry – Perota. Opisał w nim działanie optycznego wzmacniacza parametrycznego i działanie układu umożliwiającego formowanie interferogramów zawierających informację o widmie światła rozproszonego. Przedstawił też symulacje interferogramów odpowiadających zadanym rozkładom widmowym. W tym układzie eksperymentalnym rejestrowane były rozkłady widmowe światła rozproszonego w plazmie azotowej z zastosowaniem spektrometru siatkowego oraz z wykorzystaniem układu OPA-FP. Autor przedstawił rozkłady przestrzenne koncentracji oraz temperatury elektronowej wzdłuż wiązki sondującej, wyznaczone na podstawie pomiarów ze spektrometrem siatkowym, dla trzech różnych czasów. Dalej przedstawił zarejestrowane interferogramy oraz wyniki ich obróbki tzn. przejście do rozkładów widmowych a następnie do wartości temperatury, koncentracji elektronowej i średniego ładunku jonów.

Ostatni rozdział to podsumowanie, gdzie autor odniósł się do celu pracy oraz do opublikowanych wyników dla plazmy wytwarzanej w helu i wodorze. Zwrócił też uwagę na najważniejsze efekty pracy, w tym opracowane modele widm rozpraszania Thomsona i Rayleigha. Wskazał też na ograniczenia układu OPA-FP i możliwości jego ulepszenia.

Prace doktoranta dają niewątpliwie duży wkład w rozwój diagnostyki plazmy z zastosowaniem rozpraszania laserowego. Zastosowanie promieniowania laserowego o różnych długościach fal oraz systemu do pomiarów widmowych z wysoką rozdzielczością na bazie interferometru F-P w istotny sposób poszerza możliwości diagnostyczne plazmy. Istotny wkład doktoranta to także opracowane modele widm rozpraszania Thomsona i Rayleigha a w przypadku rozpraszania Thomsona zastosowanie splotu funkcji gęstości spektralnej z rozkładem Gaussa koncentracji elektronów. Realizacja pracy doktorskiej wymagała opracowania szeregu rozwiązań eksperymentalnych, dużej wiedzy z zakresu techniki laserowej, optyki, detekcji promieniowania oraz fizyki plazmy.

Mam jednak kilka uwag odnośnie pracy.

- Na stronie 5 autor napisał „Plazma jest źródłem silnego promieniowania emitowanego na zasadzie odwrotnego promieniowania hamowania elektronów w polu jonów dodatnich (tzw. przejście free – free), w trakcie rekombinacji trójcząłowej elektronów i jonów dodatnich (tzw. przejścia free – bound) ...” Zapewne odwrotne promieniowanie hamowania elektronów to tzw. inverse bremsstrahlung, jednak w wyniku tego procesu następuje absorpcja promieniowania elektromagnetycznego. Emisja promieniowania następuje w wyniku hamowania elektronów (bremsstrahlung). Z kolei w wyniku rekombinacji trójcząłowej nie ma miejsca emisja promieniowania elektromagnetycznego, jest to wychwytywanie elektronu swobodnego z udziałem drugiego elektronu swobodnego, który unosi nadmiar energii. Promieniowanie emitowane jest w wyniku rekombinacji promienistej.
- Jak pisze autor wyniki pomiarów światła rozproszonego zostały uśrednione po dużej liczbie impulsów lasera przy jednoczesnym braku idealnej powtarzalności generowanej plazmy. Pisze też o staraniach w kierunku uzyskania jak najlepszej powtarzalności. Dobrze byłoby w takim wypadku pokazać jak duże były różnice formowania plazmy w kolejnych impulsach (różnice obrazów plazmy w promieniowaniu własnym czy rozproszonym laserowym, różnice widm emisyjnych itp.).
- Wzór 2.48 wymagałby wyjaśnienia gdyż na pierwszy rzut oka widać, że nie zgadzają się jednostki po obu stronach wyrażenia
- We wzorze 2.101 zamiast 10 nm powinno być 10 ns
- W formule 3.9 jest błąd. Formuła ma strukturę podobną do formuły 2.112 z tym, że w tej ostatniej występuje czynnik  $1/n_{ref}$  natomiast w formule 3.9 czynnik ten jest dodatkowo podniesiony do potęgi -1 czyli  $(1/n_{ref})^{-1}$ . Taki sam błąd występuje we wzorach 3.14, 3.17, 3.23
- Na rysunku 3.15b jest błędne oznaczenie częstotliwości. Zamiast oznaczonego na czerwono  $\omega_a$  powinno być  $\omega_i$

Niedociągnięcia te nie wpływają jednak na moją ogólną ocenę pracy. Doceniam duży wkład pracy zarówno w konstrukcję obu układów pomiarowych, opracowanie modeli widm rozpraszania, wykonanie badań i staranne opracowanie wyników eksperymentalnych. Stwierdzam, że praca jest oryginalna o wysokim poziomie naukowym. **W związku z tym rekomenduję dopuszczenie do publicznej obrony.**

Andrzej  
Stanisław  
w Bartnik

Elektronicznie  
podpisany przez  
Andrzej  
Stanisław Bartnik  
Data: 2023.06.28  
12:56:03 +02'00'