

Warszawa, 26.10.2022r.

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

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Fornala pt.:**  
**Impurity behavior study in Wendelstein 7-X plasmas by the use of the C/O monitor system**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Fornala dotyczy opracowania systemu monitorowania jonów boru, węgla, azotu i tlenu w plazmie wytwarzanej w stellaratorze Wendelstein 7-X oraz modelowania numerycznego emisji promieniowania jonów wodoropodobnych w odniesieniu do wyników pomiarów widmowych. Konstrukcja systemu pomiarowego oraz wyniki modelowania numerycznego zostały przedstawione w publikacjach do których odpowiednie odnośniki znajdują się w pracy.

Rozprawa składa się z czterech rozdziałów, podsumowania oraz spisu literatury. Pierwszy rozdział to Wstęp, w którym autor przedstawił podstawowe informacje na temat plazmy, syntezy termojądrowej i możliwości jej realizacji w odpowiednich urządzeniach plazmowych, w szczególności w układach plazmowych z utrzymaniem magnetycznym plazmy. Szczegółowo opisał stellarator Wendelstein 7-X oraz problem zanieczyszczeń plazmy termojądrowej domieszkami cięższych pierwiastków. Dalej opisał procesy atomowe w plazmie związane z emisją promieniowania, modele termodynamiczne oraz transport zanieczyszczeń.

W rozdziale drugim autor przedstawił konstrukcję systemu do pomiarów emisji promieniowania jonów B, C, N oraz O w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego. System ten bazuje na rejestracji promieniowania jonów wodoropodobnych, Lyman- $\alpha$  z wykorzystaniem czterech niezależnych elementów dyspersyjnych: odpowiednich zwierciadeł wielowarstwowych (dla jonów B V, C VI, N VII) oraz kryształu TIAP dla jonów O VIII. W każdym z przypadków zastosowany został układ Johanna. W rozdziale tym autor przeanalizował wady i zalety różnych układów detekcyjnych. Ostatecznie wybrał kamerę CCD z możliwością jej wymiany na innego typu detektor. Przeanalizował też różnego typu zagrożenia dla systemu pomiarowego związanego z obecnością plazmy, promieniowania elektromagnetycznego w szerokim zakresie widmowym czy strumienia neutronów. Zaproponował odpowiednie zabezpieczenia.

Rozdział trzeci zawiera opis zbudowanego przez autora kodu numerycznego, przeznaczonego do analizy sygnałów rejestrowanych w opracowanym systemie pomiarowym. Opisane tutaj zostały problemy związane z geometrią systemu pomiarowego i obszarów plazmy z których rejestrowane jest promieniowanie. Opisany został sposób modelowania selektywnego odbicia od elementów dyspersyjnych oraz detekcji sygnałów. Jeden z podstawowych problemów związanych z pomiarem zanieczyszczeń poprzez rejestrację linii widmowych jest fakt, że rejestrowane promieniowanie pochodzi z różnych obszarów plazmy, o różnych parametrach. Bez dodatkowych informacji o rozkładzie przestrzennym temperatury

czy koncentracji domieszek nie można, na podstawie zarejestrowanych sygnałów, wyznaczyć poziomu zanieczyszczenia określonym pierwiastkiem. W związku z tym autor wykorzystał rozkłady temperatury i gęstości elektronowej wyznaczone we wcześniejszych eksperymentach i wprowadził do kodu odpowiednie formuły. Kod posiada też możliwość wprowadzenia informacji o rozkładzie przestrzennym stopnia jonizacji oraz koncentracji domieszek. Wprowadzone są też współczynniki emisji fotonów pobrane z bazy ADAS.

Rozdział czwarty zawiera wyniki symulacji numerycznych dotyczących wpływu różnego typu parametrów na rejestrowany sygnał. Autor przeprowadził szereg symulacji gdzie badał wpływ profili temperatury oraz gęstości elektronowej a także radialnych rozkładów zanieczyszczeń na poziom rejestrowanych sygnałów. Symulacje przeprowadzone zostały dla dwóch typów rozkładów zanieczyszczeń: o stałej gęstości oraz z maksimum koncentracji w centralnej części przekroju poprzecznego plazmy. Profile temperatury i gęstości elektronowej wyznaczone zostały na podstawie dwóch przypadków zarejestrowanych we wcześniejszych badaniach. We wszystkich przypadkach maksimum temperatury oraz gęstości elektronowej wypadało w części centralnej. Wyznaczone zostały zależności sygnału docierającego do detektora w funkcji maksymalnej wartości gęstości dla maksymalnych wartości temperatury  $T_e=1$  keV oraz  $T_e=10$  keV. Dla obu przypadków przedstawione zostały rozkłady emisyjności w funkcji promienia i gęstości elektronowej. Wyznaczone zostały też zależności sygnału docierającego do detektora w funkcji maksymalnej wartości temperatury dla maksymalnych wartości gęstości  $n_e=10^{19}\text{m}^{-3}$  oraz  $n_e=10^{20}\text{m}^{-3}$ . Dla tych przypadków przedstawione zostały rozkłady emisyjności w funkcji promienia i temperatury elektronowej. W ten sposób autor wyznaczył zależności sygnału docierającego do detektora od profili temperatury i gęstości elektronowej dla obu typów rozkładu zanieczyszczeń.

W ramach rozdziału 4 została też przeprowadzona analiza sygnałów jakie docierałyby do detektorów w kanałach C i O, gdyby były już zainstalowane, dla konkretnego wyładowania z wcześniejszej sesji pomiarowej. W wyładowaniu tym obserwowana była akumulacja domieszek węgla w części centralnej. Dodatkowo przyjęto, że radialne rozkłady jonów C VI i O VIII są identyczne. Wyniki odpowiednich symulacji numerycznych porównane zostały z wynikami uzyskanymi w symulacjach przeprowadzonych dla przypadku równomiernego rozkładu domieszek, w celu sprawdzenia na ile system monitorowania domieszek jest czuły na ich radialny rozkład. Na podstawie uzyskanych wyników symulacji autor wskazał różnice w ewolucji ilości promieniowania docierającego do detektorów dla obu typów rozkładu zanieczyszczeń. Wskazał na niewielki wpływ rozkładu zanieczyszczeń na sygnał pochodzący od jonów C VI oraz znacznie większy w przypadku rejestracji promieniowania jonów O VIII.

Prace doktoranta dają niewątpliwie duży wkład w prowadzenie przyszłych badań plazmy w stellaratorze Wendelstein 7-X. Przedstawione informacje odnośnie skonstruowanego systemu pomiaru zanieczyszczeń pozwalają stwierdzić, że różnego typu problemy związane z rejestracją linii widmowych Lyman- $\alpha$  jonów B, C, N oraz O zostały przewidziane i ich rozwiązanie w konstrukcji układu pomiarowego zostało uwzględnione. Pozwala to zakładać, że system powinien działać poprawnie.

Istotny wkład związany jest z opracowaniem kodu numerycznego przeznaczonego do wsparcia analizy wyników pomiarów poziomu zanieczyszczeń uzyskanych z zastosowaniem



skonstruowanego systemu pomiarowego. Opracowany kod umożliwi symulacje emisji promieniowania zanieczyszczeń o różnych rozkładach radialnych i wyznaczenie odpowiednich sygnałów docierających do detektorów w układzie pomiarowym.

Mam jednak kilka pytań i uwag odnośnie pracy.

- Na stronie 37 podane jest wyrażenie (14) określające objętościową gęstość mocy promieniowania typu bremsstrahlung. Nie zostały podane jednostki gęstości i temperatury elektronowej.
- Na stronie 39 w równaniu (17) występują identyczne współczynniki dla rekombinacji ze stanu  $Z+1$  na stan  $Z$  oraz ze stanu  $Z$  na stan  $Z-1$ .
- Na tej samej stronie jest następujące stwierdzenie: „...increase of the population by the recombination from the excited state and decrease by the recombination to the lower energy state.... Rekombinacja dotyczy wychwytu elektronu swobodnego przez jon co powoduje zmniejszenie krotności jonizacji a nie przejście ze stanu wzbudzonego na niższy. Odnośnie modelu koronowego należałoby jeszcze dodać równanie wiążące szybkość wzbudzenia jonu ze stanu podstawowego w wyniku zderzeń z elektronami z szybkością emisji spontanicznej.
- Na stronie 46 autor użył określeń: high energy resolution, high temporal resolution, high spatial resolution. Używanie tego typu określeń jest nieprecyzyjne. W przypadku dużego układu jakim jest stellarator za wysoką rozdzielczość czasową można uznać 1 ms a rozdzielczość przestrzenną 1 cm. W przypadku innych rodzajów plazmy np. plazmy laserowej odpowiednie wartości są o kilka rzędów wielkości mniejsze. Należałoby raczej podać wymagane wartości rozdzielczości dla odpowiednich parametrów układu diagnostycznego.
- Na stronie 50 autor podaje, że próżnia w systemie pomiarowym powinna osiągać poziom rzędu  $10^{-7}$  mbar. Ponieważ plazma w komorze ma mieć gęstość odpowiadającą gęstości gazu pod ciśnieniem 1 mbar, oznacza to siedem rzędów wielkości różnicy ciśnień bez wyładowania. Konieczny wydaje się wielostopniowy układ pompowania różnicowego. W pracy nie ma tego typu informacji.
- Na stronie 51 jest stwierdzenie „...Ion Cyclotron Resonance Heating with frequency ... and power (ICRH) [35] as well as ...”. Jak należy się domyślać powinna tu być podana wartość częstotliwości oraz mocy.
- Na stronie 53/54 jest następujące zdanie: „All indicated dispersive elements are cylindrically curved, in order to provide information not only about the respective line core, but also continuum radiation.” Nie jest jasne co ma do rzeczy wygięcie elementu dyspersyjnego odnośnie rejestracji kontinuum. Użycie płaskiego elementu również umożliwia rejestrację kontinuum.
- Autor przewiduje zastosowanie detektora CCD do rejestracji linii widmowych Lyman- $\alpha$  jonów B, C, N oraz O w układzie spektralnym z elementami dyspersyjnymi bazującymi na selektywnym odbiciu Bragga. Zastosowane zwierciadła wielowarstwowe mają jednakże wysoki współczynnik odbicia w szerokim zakresie widmowym VUV-VIS. Zwykle w takiej sytuacji stosuje się odpowiednie filtry

absorpcyjne odcinające ten zakres widmowy. W pracy nie ma jednakże informacji o zastosowaniu takich filtrów.

- Na stronie 81 dla podanych wzorów nie zostały zdefiniowane następujące wielkości:  $h$ ,  $r_k$ ,  $N_k$ .
- Na następujących wykresach: 4.7, 4.10 oraz 6 innych tego typu, osie pionowe są wyskalowane w wielkościach bezwymiarowych 0-1. W ich opisie natomiast jest intensywność [ $\text{ph}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ].
- Na stronie 120 autor pisze: „The radial distribution of  $\text{C}^{6+}$  line was measured using CXRS system, but without the simultaneous measurement of the  $\text{O}^{8+}$  line”. Metoda CXRS oczywiście umożliwia pomiar radialnych rozkładów zanieczyszczeń poprzez rejestrację odpowiednich linii widmowych emitowanych przez jony powstałe w wyniku rekombinacji np. jonów  $\text{C}^{6+}$  czy  $\text{O}^{8+}$ . Nie może być tutaj jednak emisji jakichkolwiek linii widmowych pochodzących od tych jonów ponieważ nie posiadają one elektronów. Odpowiednie linie pochodzą od jonów powstałych w wyniku rekombinacji jonów  $\text{C}^{6+}$  czy  $\text{O}^{8+}$  a więc  $\text{C}^{5+}$  lub  $\text{O}^{7+}$ .
- Mam też pewną generalną uwagę odnośnie symulacji numerycznych: maksimum emisji dla jonów wodoropodobnych tlenu w szerokim zakresie gęstości elektronowej przypada na ok. 300 eV, dla jonów wodoropodobnych boru jest to wartość 70 eV. Oznacza to, że rejestrowane promieniowanie, szczególnie dla temperatur termojądrowych, będzie pochodziło głównie z zewnętrznych obszarów plazmy. W tej sytuacji zgodność modelu z eksperymentem będzie silnie zależała od zgodności przyjętego profilu temperatury z profilem rzeczywistym.

Oczekuję, że mgr inż. Tomasz Fornal ustosunkuje się do tych uwag w trakcie obrony publicznej.

Pomimo tych niedociągnięć należy docenić duży wkład pracy zarówno w konstrukcję systemu diagnostycznego do badania poziomu zanieczyszczeń w stellaratorze Wendelstein 7-X jak i opracowanego kodu numerycznego do analizy uzyskanych wyników pomiarów. Stwierdzam, że praca jest oryginalna o wysokim poziomie naukowym. **W związku z tym rekomenduję dopuszczenie do publicznej obrony.**

