

Prof. dr hab. Jerzy Wołowski
Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie

Recenzja

pracy doktorskiej mgr Dobromiła ZAŁOGI zatytułowanej:

Badania emisji promieniowania widzialnego i rentgenowskiego oraz ocena temperatury elektronowej w wyładowaniach typu „plasma focus”

Praca została wykonana w Narodowym Centrum Badan Jądrowych w Świerku pod kierunkiem promotora prof. dr hab. Marka Sadowskiego, promotorem pomocniczym była dr Elżbieta Składnik-Sadowska

Obszar tematyczny rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca obejmuje wyniki badań wyładowań plazmowych w układach typu „plasma focus” (PF). Układ PF jest odmianą jednego z najstarszych urządzeń stosowanych do generacji gorącej plazmy zwanego „Z-pinch”. W układach „plasma focus” wyładowanie silnopiędowe w rozrzedzonej gazie zaczyna się na izolatorze oddzielającym końce dwóch współosiowych cylindrycznych elektrod. Warstwa prądowa po oderwaniu się od izolatora jest przyspieszana w obszarze między elektrodami i zapada się na osi układu na drugim końcu elektrod. Powstaje „zgęstek” gorącej plazmy emitującej promieniowanie elektromagnetyczne (widzialne i rentgenowskie) oraz prędkie elektrony i jony. Gdy komora wyładowcza jest wypełniona deuterem (lub domieszką deuteru) w plazmie mogą zachodzić reakcje syntezy jąder deuteru, w wyniku których generowane są prędkie neutrony. Układy PF stosowane są do badań procesów fizycznych w gorącej plazmie, do testowania układów diagnostycznych przygotowywanych do badań w układach termojądrowych typu tokamak i stellarator oraz do badań oddziaływań strumienia plazma z różnymi materiałami i do symulacji zjawisk astrofizycznych.

Recenzowana praca doktorska dotyczy badań określonych zjawisk plazmowych w układach „plasma focus” PF360U w NCBJ (wcześniej IPJ) i PF1000U w IFPiLM. Pomiaru wykonano głównie z użyciem aparatury do diagnostyki promieniowania optycznego i rentgenowskiego emitowanego z plazmy. Zastosowano wiele różnych układów i metod pomiarowych umożliwiających rejestrowanie rozkładów przestrzennych i czasowych parametrów plazmy.

Promieniowanie widzialne emitowane z plazmy w układzie PF badano za pomocą kamer CCD, optycznej spektroskopii emisyjnej oraz z zastosowaniem interferometrii. Analizowano ilościowo zarejestrowane widma optyczne, wyznaczano rozkłady koncentracji elektronowej plazmy i badano czasowe zmiany kształtu kolumny plazmowej. Wyniki wykonanych pomiarów optycznych posłużyły do szerszej analizy przebiegu skomplikowanych makroskopowych procesów fizycznych zachodzących w trakcie wyładowania plazmowego w układach PF360U i PF1000U po ich technicznej modernizacji.

Stosując różne diagnostyki rentgenowskie, w szczególności układy do pomiaru miękkiego promieniowania rentgenowskiego, badano głównie właściwości tworzących się w

plazmie w układach PF struktur włóknistych (zwanymi „filaments”) i mikrostruktur typu „hot spot”. Wyznaczano położenie, koncentrację plazmy i czas trwania takich substruktur obserwowanych w różnych warunkach eksperymentalnych. Wyniki pomiarów tworów typu „hot spot” porównywano z podobnymi rezultatami badań struktur typu „filaments” w tej plazmie. Powyższe pomiary bezpośrednio służyły do sprawdzenia słuszności tezy sformułowanej w pracy doktorskiej.

W pierwszej części pracy doktorskiej (rozdziały 1 i 2) podano opis zjawisk występujących w urządzeniach PF oraz ocenę dotychczasowych badań plazmy w takich układach. Następnie podano (rozdział 3) główną tezę pracy i jej uzasadnienie. W rozdziałach 4 i 5 opisano układy PF360U i PF1000U stosowane do wykonanych w pracy badań oraz wykorzystywaną aparaturę pomiarową. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych Autor pracy doktorskiej umieścił w obszernym rozdziale 6. Podsumowanie pracy jest w rozdziale 8.

Najważniejsze osiągnięcia i zalety pracy doktorskiej

- W pracy przedstawiono w sposób syntetyczny i poprawnie merytorycznie opis zjawisk fizycznych występujących w układach „plasma focus”, stan badań tych zjawisk w różnych laboratoriach (główne w FPiLM i w IPJ-NCBJ) oraz techniczne charakterystyki układów PF360U i PF1000U, w których wykonano badania opisane w pracy.
- Badania eksperymentalne wykonano z użyciem wielu uzupełniających się diagnostyk głównie optycznych stosowanych do pomiarów makroskopowych parametrów plazmy oraz różnych diagnostyk do pomiarów miękkiego promieniowania rentgenowskiego użytych do ważnych w tej pracy badań substruktur występujących w tej plazmie.
- Autor dysertacji sformułował ważną dla poznawania fizyki plazmy w układach PF tezę dotyczącą właściwości substruktur tworzonych w tej plazmie. Takie twory plazmowe mają istotne znaczenie dla nie-termicznych procesów występujących w wyładowaniach w układach PF, takich jak generacja twardego promieniowania rentgenowskiego oraz emisja prędkich jonów i elektronów. Nie-termiczne procesy wpływają też na efektywność produkcji neutronów w wyniku reakcji syntezy jąder deuteru w części mającej charakter nie-termojądrowy.
- W pracy pokazano bardzo duży zestaw wyników pomiarów wykonanych w odmiennych warunkach eksperymentalnych. Sprawdzano wpływ warunków gazowych i parametrów elektrycznych w układach PF na charakterystyki plazmy w tych układach. Interpretowano przyczyny rejestrowanych różnic.
- Szczególną wartość mają integralne i rozwinięte w czasie pomiary miękkiego promieniowania rentgenowskiego oraz analiza wyników pomiarów temperatury plazmy (także wyznaczonej lokalnie). Rezultatem tych badań jest stwierdzenie, że tworzące się w plazmie mikrostruktury typu „hot spot”, w przeciwieństwie do struktur włóknistych („filaments”), są niepowtarzalne w wyładowaniach wykonywanych w takich samych

warunkach. Te wyniki są oryginalnym rezultatem i potwierdzają tezę pracy dotyczącą natury substruktur w badanej plazmie.

- Oprócz pomiarów służących bezpośrednio sprawdzeniu słuszności postawianej w pracy tezy wykonano obszerne badania emisji promieniowania widzialnego stosując kamery CCD, spektroskopię emisyjną tego promieniowania i interferometrię. Dostarczyły nowych ważnych wyników dotyczących makroskopowych zjawisk w plazmie generowanej w układach PF oraz cennych wyników analiz widmowych promieniowania widzialnego emitowanego z plazmy w tych układach pokazujące m.in. zmiany czasowe parametrów zanieczyszczeń i elektronowej temperatury plazmy.
- W podsumowaniu podano zbiorczo najważniejsze rezultaty uzyskane w wyniku realizacji pracy. W sposób szczególny wyróżniono oryginalne wyniki pomiarów miękkiego promieniowania rentgenowskiego dostarczające informacji o naturze i zmianach czasowych substruktur w plazmie w układach PF. Wskazano na znaczenie wyników pomiarów widm promieniowania widzialnego i analiz zmian temperatury elektronowej w plazmie. Zaakcentowano rejestrowany wpływ warunków gazowych w komorze układu PF na parametry plazmy w tym układzie.
- Praca jest napisana przejrzysto, tekst jest uzupełniony odpowiednimi cytowaniami. Układ rozdziałów i podpunktów jest logiczny. Rysunki i zdjęcia są wykonane z dużą starannością i zaopatrzone w adekwatne podpisy.

Niedociągnięcia występujące w pracy doktorskiej

- W rozdziale 1 przesadnie stwierdzono, że prowadzone są rozległe badania układów „plasma focus” mające na celu przyszłe ich zastosowanie do realizacji kontrolowanej syntezy termojądrowej lekkich jąder w celu uzyskania dodatniego bilansu energetycznego. Główne badania w tym zakresie realizowane są w układach typu tokamak i stellarator, a nie w układach PF. W związku z tym przedstawiona w rozdziale 1 analiza badań termojądrowych w różnych wariantach w małym stopniu dotyczy tematyki niniejszej pracy doktorskiej.
- Z umieszczonego opisu aparatury stosowanej do badania plazmy w układach PF nie wynika jednoznacznie, czy Autora pracy stosował gotowe układy pomiarowe, czy przystosowywał i testował poszczególne metod i układy do konkretnych badań przewidzianych do realizacji pracy.
- W tytule pracy podano, że obejmuje ona badania emisji promieniowania widzialnego i rentgenowskiego oraz oceny temperatury elektronowej w wyładowaniach typu PF. Jednakże obszerne i interesujące wyniki badań wykonanych metodami optycznymi w małym stopniu powiązane są z potwierdzeniem ściśle sformułowanej tezy pracy dotyczącej natury włókien plazmowych („filaments”) i struktur „hot spots” w plazmie w układach PF. Właściwości tych tworów badano głównie stosując diagnostyki do pomiarów miękkiego promieniowania rentgenowskiego. Wyniki pomiarów optycznych dostarczają jedynie cząstkowych informacji, które mogą być wiązane ze sprawdzaniem tezy pracy.

- W pracy nie analizowano bliżej możliwych fizycznych przyczyn występowania, właściwości i zmienności czasowej badanych włókien i mikrostruktur plazmowych, chociaż są one głównymi obiektami plazmowymi badanymi w ramach pracy doktorskiej. Nie odniesiono się do rozważanych koncepcji dotyczących fizyki tych specyficznych struktur.

Ocena końcowa pracy doktorskiej

Należy uznać, że badania wykonane w ramach recenzowanej pracy doktorskiej **potwierdziły słuszność tezy** postawionej przez Autora pracy, co oznacza osiągnięcie celu tej pracy. Potwierdzeniem tezy pracy jest wykazanie **powtarzalność występowania w plazmie w układach PF włókien plazmowych („filaments”) i niepowtarzalność parametrów mikrostruktur typu „hot spots”** w wyładowaniach wykonanych w tych samych warunkach eksperymentalnych.

Oprócz osiągnięcia podstawowego celu pracy doktorskiej uzyskano nowe wyniki badań **parametrów makroskopowych plazmy i optycznych widm emisyjnych** w wyładowaniach w układach PF stosując głównie diagnostyki optyczne. Wyznaczano i analizowano **temperaturę elektronową plazmy** oraz jej rozkłady przestrzenne i czasowe.

Potwierdzono znaczący **wpływ warunków gazowych i elektrycznych** w układzie PF na właściwości wyładowań w tym układzie włączając właściwości mikrostruktur plazmowych.

Sumaryczna ocena pracy doktorskiej mgr Dobromiła Załogi jest bardzo pozytywna. Spełnia ona wszystkie wymagania merytoryczne i edytorskie stawiane dysertacjom doktorskim. Uznając dużą przewagę osiągnięć uzyskanych w wyniku realizacji badań nad nielicznymi uwagami krytycznymi wnioskuję o dopuszczenie tej pracy do publicznej obrony przez jej Autora – mgr Dobromiła Załogę. Uznaję za uzasadnione rozważenie uznanie tej pracy za wyróżniającą się.

J. Walewski