

Warszawa, 21.10.2019r.

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

Recenzja rozprawy doktorskiej Agnieszki Zaraś-Szydłowskiej pt.:
Opracowanie metodologii analizy amplitudowo-fazowej interferogramów
kompleksowych i jej zastosowanie do pomiaru spontanicznych pól magnetycznych
w plazmie laserowej na eksperymencie PALS

Rozprawa doktorska mgr Agnieszki Zaraś-Szydłowskiej dotyczy pomiaru spontanicznych pól magnetycznych w plazmie laserowej. Pomiaru te bazują na magnetoptycznym efekcie Faraday'a, wywołującym skręcenie płaszczyzny polaryzacji promieniowania laserowego, w wyniku przejścia przez obszar plazmy z polem magnetycznym. Wyznaczenie wartości pola magnetycznego wymaga jednoczesnego pomiaru kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji oraz gęstości elektronowej. Takie pomiary mogą być realizowane w oddzielnych kanałach pomiarowych, polarymetrycznym i interferometrycznym, bądź poprzez rejestrację tzw. interferogramu kompleksowego. Rozprawa doktorska mgr Zaraś-Szydłowskiej dotyczy pomiarów pól magnetycznych w wyniku rejestracji i analizy takich interferogramów. Wyniki tych pomiarów zostały przedstawione w publikacjach do których odpowiednie odnośniki znajdują się w pracy.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów, spisu rysunków oraz spisu literatury. Pierwszy rozdział to Wstęp, w którym autorka przedstawiła znaczenie badań nad plazmą laserową, głównie w odniesieniu do syntezy termojądrowej oraz symulacji plazmy występującej w przestrzeni kosmicznej a także mechanizmy generacji spontanicznych pól magnetycznych w tego typu plazmie. Drugi rozdział dotyczy stanu wiedzy związanego z tematyką pracy. Autorka przedstawiła tutaj metody diagnostyczne stosowane do pomiaru SPM wykorzystujące własności optyczne plazmy, metody bazujące na pomiarach z zastosowaniem sond magnetycznych lub prądowych a także na protonowej deflektometrii. W dalszej części skupiła się na metodzie związanej z wykorzystaniem magnetoptycznego efektu Faraday'a, pozwalającego uzyskać najwięcej informacji o polu magnetycznym, a w szczególności jego przestrzennym i czasowym rozkładzie w całym obszarze badanej plazmy. Przedstawiła wpływ pola magnetycznego na polaryzację promieniowania propagującego się w plazmie z polem magnetycznym, zasadę pomiaru, oraz układ umożliwiający jego realizację. Wyjaśniła na czym polega rekonstrukcja rozkładu pola magnetycznego w plazmie poprzez rozwiązanie równania Abela, zakładając, że struktura przestrzenna tego pola jest osiowosymetryczna. Takie założenie w przypadku plazmy laserowej wytwarzanej w wyniku oddziaływania osiowosymetrycznej wiązki laserowej z tarczą stałą jest uzasadnione. W końcowej części rozdziału autorka dokonała przeglądu badań spontanicznych pól magnetycznych w plazmie laserowej, realizowanych w różnych ośrodkach naukowych, z uwzględnieniem badań z wykorzystaniem systemu laserowego PALS w Pradze, w których brała udział.

Rozdział 3 dotyczy tezy i celu pracy. Autorka rozprawy zwróciła tutaj uwagę na problemy dotyczące realizacji pomiarów pól magnetycznych w plazmie, z zastosowaniem interferometrii kompleksowej, w szczególności trudności techniczne związane z uzyskaniem wysokiej jakości interferogramów kompleksowych i ich analizą. Przedstawiła tezę i cel pracy oraz zakres badań związanych z generacją i pomiarem SPM w plazmie laserowej. Rozdział ten zawiera też krótki opis opracowanego oprogramowania do analizy interferogramów kompleksowych, rejestrowanych w ramach badań eksperymentalnych, z wykorzystaniem systemu PALS. Przedstawiony też został układ pracy.

Rozdział 4 zawiera opis układu pomiarowego zastosowanego do kompleksowej interferometrii, jej podstawy matematyczne oraz wyniki testów oprogramowania do amplitudowo fazowej analizy interferogramów kompleksowych. Testy oprogramowania wykonane zostały dla wygenerowanych kompleksowych interferogramów syntetycznych. Ocenione zostały błędy związane z zastosowaną metodą rekonstrukcji oraz z rozdzielczością obrazu interferencyjnego. Opisany też został, opracowany przez autorkę, program do ilościowej analizy amplitudowo - fazowej interferogramów kompleksowych.

W rozdziale 5 autorka przedstawiła wyniki badań spontanicznych pól magnetycznych w plazmie laserowej wytwarzanej z wykorzystaniem systemu laserowego PALS. W badaniach zastosowano 1-kadrowy interferometr kompleksowy, w którym w charakterze promieniowania sondującego wykorzystano laser femtosekundowy, zsynchronizowany z systemem PALS. Pomiar realizowany był dla plazmy wytwarzanej w wyniku oddziaływania promieniowania laserowego z tarczami wykonanymi z ciała stałego o dużej oraz małej liczbie atomowej. W wyniku przeprowadzonych analiz autorka wyznaczyła rozkłady gęstości elektronowej, rozkłady pól magnetycznych, rozkłady gęstości prądu, energię zdeponowaną w polu magnetycznym oraz rozkłady energii elektronów. W dyskusji wyników eksperymentalnych zwróciła uwagę na zalety interferometrii kompleksowej względem klasycznej polarno-interferometrii wymagającej dodatkowych pomiarów kalibracyjnych umożliwiających uzyskanie informacji o bezwzględnych wartościach kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji. Istotne jest, że w przypadku kompleksowej interferometrii uzyskanie informacji o rozkładach amplitudy i fazy jest możliwe na podstawie pojedynczego interferogramu kompleksowego, podczas gdy w metodzie klasycznej, informacje te uzyskuje się na podstawie oddzielnie rejestrowanego polarogramu i interferogramu.

Rozdział 6 dotyczy badania plazmy formowanej w wyniku oddziaływania impulsów laserowych z tarczami o specjalnej konstrukcji, tzw. tarczami ślimakowymi. W badaniach zastosowano układ pomiarowy do 2-kadrowej interferometrii kompleksowej. Badano powstawanie spontanicznych pól magnetycznych generowanych w wyniku przepływu prądu w materiale tarczy. Autorka pracy uczestniczyła w tych badaniach realizując pomiary SPM metodą interferometrii kompleksowej. Układ pomiarowy umożliwiał rejestrację dwóch interferogramów kompleksowych dla różnych czasów względem maksimum intensywności impulsu laserowego wytwarzającego plazmę. Z uwagi na rozrzut synchronizacji nie było możliwe zadanie dokładnego odstępu czasu pomiędzy głównym impulsem laserowym a impulsami sondującymi, natomiast odstęp ten można było zmierzyć z dokładnością do 1 ps. Z uwagi na inną geometrię pola magnetycznego i rozkładu gęstości elektronowej niż przy oddziaływaniu lasera z płaską tarczą, wytwarzane pole magnetyczne nie było osiowo

symetryczne, nie stosowano więc inwersji Abela. Z drugiej strony, można było przyjąć, że na odcinku sondowania odpowiadającemu w przybliżeniu szerokości wstęgi, z której wykonana była tarcza, pole ma stałą wartość w kierunku promieniowania sondującego. Przy takim założeniu można było wyznaczyć rozkład indukcji pola magnetycznego w wytwarzanej plazmie. W badaniach dodatkowo zastosowane zostały również inne układy pomiarowe: rentgenowski układ obrazujący w linii K_{α} miedzi, elektronowy spektrometer magnetyczny, układ kolektorów siatkowych do pomiaru rozkładów kątowych emisji jonów, sondy prądowe oraz 4-kadrowa kamera rentgenowska. Rozdział kończy się dyskusją wyników eksperymentalnych.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie osiągnięć mgr. Zaraś-Szydłowskiej. Dotyczy ono zarówno przygotowania i przeprowadzenia badań eksperymentalnych jak i opracowanego oprogramowania oraz analizy i interpretacji wyników eksperymentalnych. Rozdział kończy się odniesieniem do tezy i realizacji celów badań.

Niewątpliwie największym osiągnięciem doktorantki jest opracowanie metodologii analizy amplitudowo-fazowej interferogramów kompleksowych i jej zastosowanie do pomiaru spontanicznych pól magnetycznych generowanych w plazmie laserowej. Duże wrażenie robią wyznaczone rozkłady pól magnetycznych o złożonej strukturze przestrzennej. Uzyskanie odpowiedniej jakości interferogramów w badaniach eksperymentalnych z zastosowaniem lasera femtosekundowego, zsynchronizowanego z systemem PALS, nie było zadaniem prostym. Na podstawie słabej jakości interferogramów nie byłoby możliwe wyznaczenie rozkładów SPM z tak dużą dokładnością. Nawet jednak dobrej jakości interferogramy wymagają starannej obróbki i przygotowania do dalszej analizy numerycznej. Opracowanie oprogramowania pozwalającego na taką obróbkę należy uznać za duży wkład do badań prowadzonych przez zespół IFPiLM w ośrodku PALS.

Mam jednak kilka pytań i uwag odnośnie pracy.

Strona 3

Co należy rozumieć pod pojęciem tarcza masywna? Prawdopodobnie jest to tarcza z ciała stałego, nie jest jednak jasne czy jest to płytko o grubości rzędu 1mm czy cienka folia jest również tarczą masywną. Czy jest to lity materiał, czy może być to materiał spieniony? Należałoby to zdefiniować.

Strona 10

Autorka pisze:

„W procesie tym pole magnetyczne może być generowane w wyniku względnego ruchu między elektronami i jonami, który jest napędzany przez rotację [26].” Co należy rozumieć pod pojęciem „napędzany przez rotację”?

„Co więcej, SPM generowane przez kinetykę szybkich osiągają amplitudę od kilku do kilkudziesięciu MGs ...”. Zapewne miało być „szybkich elektronów”.

„...namagnesowany strumień powstaje w wyniku implozji (ekspansji radialnej) plazmy ...” Jak należy rozumieć „implozji (ekspansji radialnej)”?

Strona 14

Brak znaku „=” we wzorze na częstość plazmową, ponadto należałoby podać układ jednostek odnośnie tego wzoru, ponieważ nie jest to układ SI. Jest to uwaga ogólna odnośnie równań i wzorów zawartych w pracy.

Strona 26

Autorka pisze:

„...w odróżnieniu od rozkładów SPM generowanych z tarcz plastikowych, które są nieco szersze ...”. Słowo plastik jest określeniem potocznym dla tworzyw sztucznych, które mogą mieć różny skład i strukturę molekularną. W pracy naukowej należałoby raczej używać określenia polimer organiczny, podając jego nazwę a najlepiej również producenta, z uwagi na fakt, że mogą występować różnice pomiędzy tego typu materiałami pochodzącymi od różnych producentów.

Strona 36

W równaniu 4.5 które jest wynikiem całkowania po czasie równanie 4.3 występuje zależność od czasu dla $\delta(y,z,t)$:

$$i(y, z) = a_p^2(y, z) + a_r^2(y, z) + 2a_p(y, z)a_r(y, z) \times \cos[2\pi(\omega_0 y + \nu_0 z) + \delta(y, z, t)]$$

W równaniu 4.6

$$i(y, z) = b(y, z) + v(y, z) \exp[2\pi i(\omega_0 y + \nu_0 z) + v^*(y, z) \exp[2\pi i(\omega_0 y + \nu_0 z)]$$

nawiasy kwadratowe nie są zamknięte.

W podrozdziale 4.3.1 przeprowadzone zostały testy rekonstrukcji dla różnych interferogramów syntetycznych. Warto by jednak wykonać testy dla bardziej złożonych funkcji rozkładu, gdyż interferogramy uzyskane w eksperymentach mają znacznie bardziej złożoną strukturę od interferogramów testowych. W podrozdziale tym jest też stwierdzenie: „Dokładność odtwarzania maksymalnych wartości kątów dla $\varphi_{max} = 1^\circ$ i $\varphi_{max} = 2^\circ$ wynosi odpowiednio 93% i 97,5%.” natomiast w następnym podrozdziale autorka stwierdza: „...błąd dopasowania dla poszczególnych rozdzielczości przedstawia się następująco: dla 512 wynosi 236%, dla 1024 wynosi 84%, natomiast dla 2048 jest najmniejszy i wynosi 55%.” Nie bardzo wiadomo jak to rozumieć. Wartości błędów związanych z rozdzielczością są bardzo duże, co najmniej o rząd wielkości większe w porównaniu z innymi błędami. Zapewne jest to związane z niewielką liczbą pikseli, które występują w analizowanym przekroju, ale to nie zostało wyraźnie powiedziane.

Strona 47

Autorka pisze:

„Po wyznaczeniu rozkładu kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji poddawany jest on symetryzacji względem osi Z.” Należałoby pokazać efekt takiej symetryzacji i określić jak to wpływa na dokładność rekonstrukcji.

Strona 55

Autorka używa pojęć „ciężka plazma”, „ciężki materiał” są to określenia żargonowe, nie należy ich stosować w tekstach naukowych.

Strona 70

Autorka używa pojęcia „plazma plastikowa”. W literaturze używa się określenia plazma tlenowa czy argonowa, ale jest to uzasadnione tym, że jest ona wytwarzana w tlenie lub argonie i zawiera wyłącznie atomy lub jony tych pierwiastków, w tlenie dodatkowo jony molekularne oraz cząsteczki tlenu. Nie ma natomiast plazmy z jonami czy molekułami „plastiku”. Coś takiego nie istnieje, chyba, że chodziłoby o tzw. „dusty plasma” ale nawet wtedy nie należałoby używać określenia „plazma plastikowa”.

Strona 71

Autorka pisze: „prędkość termiczna elektronów wynosi około 2×10^7 cm/s”. Nie jest jasne jak została oszacowana średnia wartość prędkości elektronów ale takiej prędkości odpowiada temperatura rzędu 0.1 eV co jest o kilka rzędów wielkości mniej niż w rzeczywistości. Jeśli przyjąć temperaturę elektronową na poziomie 100eV, co jest typową wartością dla plazmy laserowej, średnia prędkość elektronów odpowiadająca tej temperaturze wyniesie około 4×10^8 cm/s.

Rysunek 6.8

Ten rysunek jest niejasny. Tarcza ślimakowa jest przedstawiona w formie prostokąta. Nie jest jasne jej usytuowanie względem układu pomiarowego.

Mam jeszcze jedną uwagę odnośnie składowej B_ϕ indukcji pola magnetycznego dla $r = 0$. Z rysunków 5.8 oraz 5.9 wynika, że $B_\phi(r = 0) > 0$. Byłoby to możliwe np. dla $j_z(r) \sim 1/r$, co jednak oznacza, że dla $r \rightarrow 0$, $j_z \rightarrow \infty$. Skończona wartość $B_\phi(r = 0)$ wynika niewątpliwie z ograniczeń metody rekonstrukcji i rozdzielczości układu detekcyjnego. W pracy nie znalazłem jednak tego typu informacji.

Oczekuję, że mgr Zaraś-Szydłowska ustosunkuje się do tych uwag w trakcie obrony publicznej.

Pomimo tych niedociągnięć należy docenić duży wkład pracy zarówno w przygotowanie i przeprowadzenie pionierskich badań eksperymentalnych dotyczących pomiaru rozkładów pól magnetycznych w plazmie laserowej, opracowanie oprogramowania do analizy amplitudowo-fazowej interferogramów kompleksowych i ostatecznie wyznaczenie rozkładów SPM. Stwierdzam, że praca jest oryginalna o wysokim poziomie naukowym. **W związku z tym rekomenduję dopuszczenie do publicznej obrony.**

