

Warszawa, 25.11.2024 r.

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

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Łukasza Węgrzyńskiego:  
„Urządzenia do wytwarzania impulsowych tarcz klasterowych oraz aerozolowych na  
potrzeby badań oddziaływania impulsów laserowych z materią”**

Przedstawiona do recenzji praca Pana mgr. inż. Łukasza Węgrzyńskiego zatytułowana *Urządzenia do wytwarzania impulsowych tarcz klasterowych oraz aerozolowych na potrzeby badań oddziaływania impulsów laserowych z materią*, napisana pod opieką dr. hab. inż. Andrzeja Bartnika, prof. Wojskowej Akademii Technicznej, dotyczy badań konstrukcyjnych i eksperymentalnych zaprojektowanych kompaktowych urządzeń do wytwarzania struktur gazowo-klasterowych lub aerozolowych w warunkach próżniowych. Samo pojęcie ‘tarczy laserowej’ jest dość potoczne, ale Pan Węgrzyński bardzo dobrze zdefiniował to pojęcie już na początku pracy, gdzie wyjaśnił, że odnosi się ono do materiału, na którym ogniskowana jest wiązka laserowa, która prowadzi do generacji różnych procesów.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim, liczy 229 stron i składa się z 5. głównych rozdziałów, 3 dodatków zawierających rysunki wykonawcze, techniczne i schematy elektryczne zbudowanych komponentów oraz spisu ilustracji, tabel i bibliografii, która zawiera odnośniki do 185 pozycji literaturowych.

Rozdział pierwszy dysertacji stanowi wprowadzenie do tematyki pracy, zawiera opis rozwoju systemów laserowych, jak również opis procesów oddziaływania impulsów laserowych z materią. Dobrze opisany został skrócony rys historyczny rozwoju laserów, od masera przez laser He-Ne po wielkie instalacje laserowe.

Rozdział drugi zawiera opis aktualnego stanu wiedzy na temat tarcz laserowych, które są głównym tematem pracy doktorskiej. Autor opisuje tu wpływ parametru gęstości tarczy na stopień absorpcji impulsu laserowego w plazmie, definiując m.in. gęstość krytyczną. Przedstawia problematykę wytwarzania plazmy za pomocą impulsów laserowych w wyniku oddziaływania z różnego rodzaju tarczami i w związku z tym definiuje trzy podstawowe rodzaje tarcz laserowych: stałe, ciekłe i gazowe. Każdy rodzaj został oddzielnie omówiony wraz z mechanizmami jakie towarzyszą podczas oddziaływania z impulsem laserowym oraz wadami i ich zaletami. Ponadto, w przypadku tarcz ciekłych i gazowych omówiony został sposób ich wytwarzania. Zostało tu również podkreślone, że możliwe jest wytworzenie tarcz aerozolowych, w których zarówno gaz jak i ciecz tworzą plazmę laserową. Na koniec tego rozdziału mgr inż. Węgrzyński prezentuje motywacje prowadzonych badań i stawia 3 tezy pracy, które związane są:

- z opracowaniem układu do wytwarzania tarcz gazowych zawierających duże klasterki gazowe bez chłodzenia kriogenicznego;

- z możliwością wytworzenia tarczy aerozolowej bezpośrednio w ognisku laserowym za pomocą układu do nebulizacji cieczy;
- z zastosowaniem tarczy klasterowej lub aerozolowej w laserowo-plazmowym źródle EUV, stanowiącym modyfikację źródła bazującego na tarczy gazowej i umożliwiającym pokonanie ograniczeń związanych ze stosowaniem tarczy gazowej.

Rozdział trzeci stanowi główny trzon pracy doktorskiej Pana Węgrzyńskiego i zawiera opis impulsowych tarcz nowego typu wraz z wyjaśnieniem tematyki klasterów i aerozoli w zastosowaniu jako tarcze. Autor wyczerpująco uzasadnił poszukiwania nowych rozwiązań oraz wyjaśnił pojęcia klasterów i struktur gazowo-klasterowych. Zaprezentował systemy do wytwarzania tarcz klasterowych metodą ablacji laserowej w atmosferze gazu buforowego, na bazie materiałów stałych, jak również opisał system do wytwarzania tarcz aerozolowych metodą termosprejów. Wspólną częścią opracowanego systemu do wytwarzania tarcz typu klasterowego i aerozolowego jest kontroler elektroniczny, który został w pełni, zarówno pod względem hardware'owym jak i software'owym opracowany przez mgr. inż. Węgrzyńskiego, a szczegóły schematów elektrycznych zostały zawarte w Dodatku C. Warto zauważyć, że opis każdego z elementów systemu do produkcji tarcz gazowych pokazuje ogrom pracy Autora, jaki został włożony w przegląd literatury, w rozeznanie rynku oraz sprawdzenie eksperymentalne proponowanych rozwiązań. Każdy element został bardzo dokładnie opisany, zbudowany, każda możliwość rozważona, a materiały konstrukcyjne dobrze przemyślane, a ich wybór uzasadniony.

Rozdział 4 dysertacji przedstawia wybrane metody badań opracowanych wcześniej tarcz aerozolowych. Opisana jest tu radiografia impulsowa oraz rozpraszanie promieniowania laserowego. W celu zobrazowania przemieszczających się mikrometrowych cząstek z odpowiednią ostrością Autor zaproponował nowy sposób monitorowania tego procesu za pomocą układu optycznego. W ten sposób mgr inż. Węgrzyński opracował układ do mikroskopii optycznej w warunkach próżniowych wraz z uchwytem umożliwiającym chwilowe zatrzymanie struktur klasterowych.

Ostatni rozdział pracy doktorskiej Pana Węgrzyńskiego przed Podsumowaniem dotyczy zastosowania opracowanych urządzeń do wytwarzania plazmy laserowej. Nowym elementem opisanym w przedłożonej do recenzji pracy doktorskiej są eksperymenty z wykorzystaniem ultra-krótkich impulsów laserowych do badań oddziaływań z tarczami dwugazowymi. W tym przypadku eksperyment we współpracy z Uniwersytetem Friedricha Schillera w Jenie został bardzo dobrze zaplanowany, co zostało wyczerpująco opisane przy omawianiu układu eksperymentalnego. Przeprowadzone badania, zarówno z wykorzystaniem ultra-krótkich impulsów laserowych czy też nanosekundowych, potwierdziły możliwość budowy wydajnych źródeł laserowo-plazmowych emitujących promieniowanie w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego czy też ekstremalnego ultrafioletu.

Mgr inż. Łukasz Węgrzyński w ramach przedstawionej pracy doktorskiej skonstruował oraz przedstawił wyniki badań dotyczących dwóch nowych systemów do wytwarzania tarcz laserowych bazujących na idei tarcz gazowych. Opisane urządzenia, sklasyfikowane jako systemy do wytwarzania tarcz o ograniczonej masie (ang. Mass Limited Target, MLT), wykorzystują hybrydowe połączenie zalet tarcz gazowych, ciekłych oraz tarcz ciał stałych.

Omówione w niniejszej dysertacji rozwiązania i wyniki badań zostały zaprezentowane w 7 artykułach naukowych, które znajdują się w wykazie bibliografii. Patrząc na listę prac autora związaną z tematyką pracy doktorskiej widać, jak Pan Węgrzyński rozwijał się na przestrzeni lat, publikując na początku swojej drogi doktoranta w czasopiśmie za 5 pkt wg wykazu listy ministerialnej aż do czasopism wysoko-punktowanych po 70, 100, a nawet 140 pkt. Warto dodać, że w każdej z prac Pan Węgrzyński jest pierwszym bądź drugim współautorem. Ponadto, opracowane w ramach dysertacji dwa systemy do wytwarzania tarcz aerozolowych zostały zgłoszone do ochrony patentowej, a system do wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych zawierających klaster jest w trakcie przygotowania procedury związanej z ochroną patentową.

Poniżej przedstawiam kilka uwag i pytań do przedłożonej pracy:

- na str. 46 pracy mgr Węgrzyński opisując problemy technologiczne związane z systemami tarcz aerozolowych odnosi się do jednego z nielicznie działających rozwiązań, które zostało opracowane przez zespół w składzie Ter-Avetisyan, Schnürer, Nickles, jednak w tekście brak jest odnośnika do bibliografii – znajduje się on dopiero w podpisie rysunku, który przedstawia omawiany schemat.
- Na stronie 50 dysertacji Pan Węgrzyński zauważa, że *„Z uwagi na to, że praktycznie każdy znany pierwiastek znajdujący się w postaci ciała stałego może być doprowadzony do postaci ciekłej, np. jako roztwory koloidów metalicznych, postaci soli bądź innych substancji rozpuszczonych w danym roztworze, plazma laserowa wytworzona na bazie takiej tarczy może cechować się znacznie lepszymi parametrami w odniesieniu do plazmy laserowej indukowanej za pomocą dotychczasowych systemów tarcz laserowych.”*- przy takim stwierdzeniu dobrze byłoby wyjaśnić, co w tym przypadku oznaczają „lepsze parametry”.
- W podrozdziale 3.2.1 omówiony został zaprojektowany zawór gazowy do wytwarzania chłodzonych tarcz gazowych. W celu optymalizacji konstrukcji zaworu mgr Węgrzyński wykonał szereg badań eksperymentalnych oraz przeprowadził szczegółową analizę materiałów wykorzystywanych do budowy urządzenia. Omawiany zawór składa się z układu dysz współosiowych, którego średnice zostały dobrane eksperymentalnie. Ciekawa jestem jakie rozwiązania były brane pod uwagę, w jakim przedziale średnice rozważano, aby ostatecznie dokonać wyboru 700 i 1500  $\mu\text{m}$ .
- W układzie chłodzenia zaworu elektromagnetycznego pomiędzy Peltierem a chłodnicą wodną zastosowano specjalną folię węglową o wysokiej przewodności cieplnej, która, jak stwierdza mgr Węgrzyński *„w pełni spełniła swoje zadanie nie wprowadzając widocznych zanieczyszczeń do wnętrza komory”*. W jaki sposób zostało to określone?
- W rozdziale dedykowanym systemowi do impulsowego wytwarzania tarczy aerozolowej, przy opisie nebulizacji hydraulicznej, Autor omawia wady i zalety różnych układów. Jednym z nich jest rozwiązanie opracowane w konstrukcji opatentowanej przez zespół Sargis Ter-Avetisyan i inni – w tekście brakuje odnośnika do bibliografii [92]. Innym omawianym przykładem są rozwiązania opracowane przez grupę Mountforda - tu również brakuje odnośnika do referencji [110]. Przy okazji, ta sama praca umieszczona jest pod referencją [179].
- Rysunek 58 przedstawia procedurę synchronizacji czasowej systemu wytwarzania tarczy z impulsem laserowym. W tekście pod rysunkiem omyłkowo czas opóźnienia nazwany jest czasem otwarcia.

- W badaniach opisanych na str. 125 przed detektorem umieszczono folię Mylarową – przy opisie eksperymentu dobrze byłoby podać jej grubość, co zweryfikowałoby stwierdzenie, że „*Transmisja folii w badanym zakresie widmowym była bliska jedności i może być całkowicie pominięta podczas analizy zarejestrowanych obrazów.*”.
- Na str. 128 przedstawiona jest zależność analityczna wykorzystana do opracowania dwuwymiarowych map gęstości tarczy, która, jak twierdzi Autor „*nadaje się do analizy radiogramów, w których źródło promieniowania było monochromatyczne oraz emitowało promieniowanie w zakresie energii fotonów  $E=50-30000$  eV.*”- wskazane byłoby skomentować, z czego wynika podany przedział.
- Na rysunku 62 brakuje jednostek gęstości - z tekstu można domyśleć się, że chodzi o  $\text{at}/\text{cm}^2$ .
- Rysunek 70 przedstawia przykładowe wyniki symulacji dla rozpraszania na cząstkach wytworzonych z sześćcio-fluorku siarki o różnej średnicy. Rysunek 71 przedstawia z kolei porównanie wyników eksperymentalnych z symulacjami dla cząstek o średnicy  $1.7 \mu\text{m}$ , jednak porównując wyniki symulacji na obu rysunkach wygląda na to, że ich wartości różnią się o rząd – z czego to wynika?
- W podrozdziale 4.3 na str. 146 Pan Węgrzyński opisuje wyniki eksperymentów mających na celu zobrazowanie przemieszczających się cząstek. Tak jak średni rozmiar generowanych struktur we wszystkich przypadkach oszacowany został na ok.  $2 \mu\text{m}$ , tak liczba wytwarzanych klasterów różniła się i była najmniejsza dla ksenonu, natomiast dla sześćcio-fluorku siarki była 1.5 razy większa, a dla dwutlenku węgla, aż 5 razy większa niż dla tarczy na bazie ksenonu. Przydałaby się dyskusja, z czego może wynikać taka sytuacja.
- W rozdziale 5 Pan Węgrzyński opisując zastosowanie opracowanych urządzeń do wytwarzania plazmy laserowej, w ramach jednego z eksperymentów dokonał pomiaru możliwości wpływania na widmo emitowane z plazmy generowanej w wyniku oddziaływania impulsu laserowego z tarczami typu aerozolowego. Z czego wynika zastosowanie tarcz na bazie metanolu i roztworu metanolu z bromkiem sodu? Czy z dostępności? Czy miało to jakieś specjalne zastosowanie?
- W eksperymencie opisanym na str. 153 z wykorzystaniem ultra-krótkich impulsów laserowych do badań oddziaływań z tarczami dwugazowymi, pomiary dokonano dla tarczy wytworzonej na bazie dwutlenku węgla i ksenonu, dla których znalezione zostały optymalne warunki wytwarzania się klasterów. Opisując szacowaną ilość fotonów emitowanych w zakresie okna wodnego, przydałby się komentarz lub odnośnik, w jaki sposób dokonano oszacowania.
- W tym samym eksperymencie, obrazowania plazmy dokonano za pomocą układu kamery otworkowej, w skład której wchodził filtr tytanowy o grubości  $500 \text{ nm}$ . Dobrze byłoby zamieścić transmisje filtra, tym bardziej że wycina on zakres emisji plazmy ksenonowej i wpływa na oszacowanie energii impulsu laserowego.

Oczekuję, że mgr inż. Węgrzyński odniesie się do powyższych uwag podczas obrony publicznej.

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Węgrzyńskiego nie jest wolna od błędów interpunkcyjnych czy drobnych literówek. Nie mają one jednak wpływu na merytoryczną ocenę rozprawy. Podobnie jak w wielu przypadkach brak kropek na końcu podpisów pod rysunkami.

Zakres pracy doktorskiej mgr. inż. Węgrzyńskiego jest bardzo szeroki, a przeprowadzone i opisane prace konstrukcyjne oraz eksperymentalne w pełni potwierdziły stawiane na początkowym etapie trzy tezy.

Podsumowując, **przedłożona do recenzji praca** w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i według mnie **zasługuje na wyróżnienie**. Wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Węgrzyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

