



**Wojskowa
Akademia
Techniczna**
im. Jarosława Dąbrowskiego



dr hab. inż. Przemysław Wachulak
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
tel: (+48) 261-839-540
e-mail: wachulak@gmail.com

Warszawa, 8 lipca 2016 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. Romana Dudźaka
pod tytułem „Implementation of the femtosecond polaro-interferometry in
research on PALS facility, related to shock ignition concept of ICF”**

Praca doktorska magistra Romana Dudźaka powstała pod kierunkiem prof. dr. hab. Tadeusza Pisarczyka. Praca została złożona w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku w 2016 roku. Praca dotyczy aktualnych i bardzo ważnych zagadnień związanych z zastosowaniem diagnostyki pracującej w zakresie femtosekundowym w badaniach nad oddziaływaniem promieniowania laserowego z materia.

W pracy Autor stosuje dwie techniki optyczne, takie jak interferometria i polarymetria optyczna, do badania wczesnych etapów ekspansji plazmy laserowej związanej z fuzją laserową. Autor w swojej pracy bazuje na impulsach laserowych o bardzo krótkim czasie trwania, generowanych przez system lasera femtosekundowego pracującego na bazie ośrodka tytanowo-szafirowego. W ramach swojej pracy przygotowuje, konfiguruje i testuje femtosekundowy interferometr trzykanałowy oraz dwukanałowy polaro-interferometr jako nowe narzędzia diagnostyczne do badań oddziaływania promieniowania laserowego z materia. Jednym z najważniejszych aspektów pracy doktorskiej, który jest podstawą do dalszych badań, jest zapewnienie stabilnej synchronizacji czasowej pomiędzy dwoma oddzielnymi i niezależnymi systemami laserowymi. Zazwyczaj taką synchronizację przeprowadza się poprzez podział wiązki laserowej i następnie użycie obu wiązek: pompującej i próbującej w eksperymentach typu „pump & probe”. Osiągnięciem Autora jest w tym przypadku zapewnienie, iż dwa niezależne systemy laserowe zostały zsynchronizowane w stabilny sposób z dokładnością +/- 100 ps,

które moim zdaniem jest zadaniem dość trudnym i jest niewątpliwie konieczne w przypadku rejestracji interferogramów przy użyciu interferometru trzykadrowego z opóźnieniem pomiędzy kolejnymi kadrami rzędu ułamka nanosekundy.

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera 7 rozdziałów, 172 stron, w sumie ponad 90 ilustracji i rysunków, wyjaśniających pewne aspekty tej pracy i przedstawiających wyniki eksperymentalne oraz rezultaty analizy danych pomiarowych, a także 88 odnośników literaturowych do prac głównie z czasopism z listy filadelfijskiej. Moim zdaniem praca ma charakter eksperymentalny, jednakże wyniki eksperymentalne są również często porównywane z wynikami modelowania numerycznego, stosowanego w celu wyjaśnienia istotnych zjawisk, zarówno przez samego Autora, lub też w ramach współpracy pomiędzy grupami badawczymi, czego przykładem może być współpraca, w ramach której zastosowano dwuwymiarowy kod hydrodynamiczny o nazwie ATLANT-HE z Instytutu Fizycznego im. Lebedeva w Moskwie.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do pracy, w ramach którego Autor przedstawia kilka najbardziej obiecujących metod realizacji syntezy termojądrowej. Autor przedstawia koncepcje związane z fuzją magnetyczną i inercyjną (ang. inertial confinement fusion ICF), w której rozpatruje różne sposoby dostarczania energii do kompresji kapsuły paliwa, a mianowicie bezpośrednio ogrzewanie, ogrzewanie pośrednie, szybki zapłon i zapłon szokowy, porównując te metody pod względem ich zalet i wad. Ma to na celu stworzenie podstaw teoretycznych dla informacji zawartych w następnych rozdziałach, dotyczących zastosowania femtosekundowych narzędzi diagnostycznych do badania plazmy w eksperymentach związanych z ICF.

Rozdział drugi zawiera przegląd literaturowy prac prowadzonych głównie na infrastrukturze badawczej PALS (Prague Asterix Laser System), związanych z tematem pracy doktorskiej, przedstawiający prace Autora i jego grupy, jednakże nie pomijając wkładu badaczy zajmujących się podobną tematyką z innych grup badawczych. W tym rozdziale Autor przedstawia również szczegółowe informacje dotyczące zastosowania opracowanych, poprzednio wymienionych narzędzi diagnostycznych w ramach badań prowadzonych na PALS w doświadczeniach związanych z ekspansją plazmy i przyspieszenia makro-cząstek, takich jak folie i dyski, oszacowaniem rozkładu gęstości elektronowej plazmy ablacyjnej, w eksperymentach pozwalających na uzyskanie ważnych informacji o procesie sferycznej implozji, analizowania zjawisk ablacji i tworzenia kraterów ablacyjnych powstających z wykorzystaniem próbek – tarcz (ang. targets) o różnej geometrii, badania transportu energii w porowatych materiałach, wdrożenie nowego sposobu wytwarzania naddźwiękowego przepływu plazmy z wysokimi prędkościami, rzędu kilkuset km/s lub wytwarzania zbieżnego strumienia plazmy powstającej na skutek interakcji promieniowania laserowego z lekkimi (niska liczba atomowa Z) materiałami, takimi jak aluminium.

Rozdział trzeci definiuje hipotezę i skupia się na przedstawieniu celu prezentowanej pracy doktorskiej. Hipoteza pracy dotyczy możliwości uzyskania informacji na temat parametrów plazmy, takich jak dystrybucja gęstości elektronów i pola magnetycznego w płazmie przy użyciu polaro-interferometrii femtosekundowej. Ponadto, w połączeniu z pomiarami ablacyjnymi (badania profili i określanie objętości kraterów) oraz pomiarami emisji elektronów i jonów otwiera drogę do identyfikacji mechanizmów absorpcji promieniowania laserowego w płazmie dla zastosowań w inercyjnej fuzji.

Rozdział czwarty przedstawia szczegóły dotyczące opracowanych systemów diagnostyki femtosekundowej, takich jak wcześniej wspomniany interferometr trzykadrowy i dwukanałowy polaro-interferometr. Opisuje szczegółowo zasadę działania obu systemów diagnostyki plazmy laserowej. W tym rozdziale Autor przedstawia również opracowaną przez siebie metodę do synchronizacji fotodysocjacyjnego sub-nanosekundowego lasera jodowego na PALS z laserem femtosekundowym opartym na ciele stałym w postaci kryształu szafiru domieszkowanego tytanem (Ti:Sa). Autor opisuje różne próby synchronizacji obu układów, takie jak między innymi zastosowanie zewnętrznie wyzwalanego oscylatora w postaci lasera włóknowego, którego stabilizowana emisja miała miejsce na długości fali lasera jodowego 1315.24 nm do „zasiewania” (ang. seeding) wzmacniaczy jodowych, jednakże wspomina, iż liczba fotonów na wyjściu lasera włóknowego nie była wystarczająca do pobudzenia. W rezultacie badań opracował metodę, w której synchronizował mody w oscylatorze lasera jodowego przez modulator akustooptyczny, sterowany przez zegar, który również sterował blokiem synchronizacji w laserze Ti:Sa. Pozwoliło to na uzyskanie rozrzutu czasowego synchronizacji pomiędzy impulsami z obu systemów laserowych rzędu 100 ps, który jest w istocie dużo krótszy niż sam czas trwania impulsów lasera jodowego - 350 ps. W tym rozdziale Autor przedstawia również szczegółowo schemat i parametry lasera jodowego na PALS, który jest głównym laserem pompującym we wszystkich eksperymentach związanych w generacją i diagnostyką plazmy, a także oddziaływaniem promieniowania laserowego z materią, zaprezentowanych w pracy doktorskiej. Dodatkowo Autor przedstawia system lasera Ti: Sa, który jest używany jako laser sondujący w femtosekundowych narzędziach diagnostycznych stosowanych w tej pracy.

Głównym rozdziałem pracy jest rozdział piąty, który dotyczy zastosowań interferometrii femtosekundowej w badaniach transportu energii impulsów laserowych do fal uderzeniowych. W tym rozdziale Autor udowadnia przydatność interferometrii do badania wpływu warunków pobudzenia różnych tarcz poprzez interakcję impulsów laserowych z materiałem tarczy w eksperymentach związanych z zapłonem szokowym. Autor przedstawia warunki doświadczalne i geometrię tarcz stosowanych w badaniach. W ramach pracy Autor przedstawia dwa główne eksperymenty przeprowadzone z użyciem pojedynczego impulsu laserowego jak i podwójnych impulsów (z tzw. pre-impulsem i głównym impulsem laserowym),

dotatkowo stosując podstawową długość fali lasera jodowego i jego trzecią harmoniczną na długości fali 438 nm. Dane pochodzące z interferometru trzykadrowego uzupełniono o dodatkowe informacje pochodzące z dodatkowej diagnostyki plazmy, tj. ze spektrometru rentgenowskiego, z widma którego Autor oszacował temperaturę i gęstość elektronową, dwuwymiarowego obrazowania rozkładu szybkich elektronów opartego na wykrywaniu emisji linii Cu K- α , kolektorów/detektorów jonowych od oszacowania emisji jonów z plazmy laserowej i dodatkowo z pomiarów objętości kraterów ablacyjnych wytworzonych podczas interakcji promieniowania laserowego z tarczą do oceny efektywności transferu energii lasera do fali uderzeniowej. W obu przypadkach dla wiązek 1ω i 3ω Autor prezentuje trzykadrowe interferogramy zarejestrowane dla różnych wielkości ogniska laserowego (promień ogniska laserowego od 50-200 mikronów), przy istnieniu i przy braku pre-impulsu. Z interferogramów Autor zrekonstruował gęstości elektronów, poosiowe profile gęstości i tzw. ang. scalelengths, charakteryzujące ablacyjną ekspansję plazmy podczas oddziaływania impulsów lasera z tarczą dwuwarstwową miedziowo-parylenową. Autor porównuje i wyciąga wnioski co do maksymalnego gradientu gęstości i scalelengths dla dwóch przypadków z i bez pre-impulsu (generującego pre-plazmę) dla różnych czasów w trakcie ekspansji plazmy, mierzonych od chwili osiągnięcia przez główny impuls laserowy maksymalnej intensywności (0, 300 i 600 ps), gęstości liniowej i całkowitej liczby elektronów w plazmie. Dodatkowo, Autor zmierzył objętości kraterów ablacyjnych, dzięki którym oszacował parametr N/V_{cr} . Parametr ten jest dobrym wskaźnikiem efektywności absorpcji promieniowania laserowego. Przy użyciu dodatkowej diagnostyki plazmy, o której wspominałem wcześniej, a która jest dostępna na PALS, Autor zmierzył widma rentgenowskie, które posłużyły mu do oszacowania gęstości i temperatury elektronowej w pobliżu powierzchni tarczy, w funkcji promienia ogniska laserowego. Dodatkowo obrazuje plazmę dzięki emisji K- α , przy użyciu sferycznie wygiętego kryształu kwarcu oraz uzupełnia te pomiary, stosując metodę numeryczną Monte Carlo, o symulacje transportu elektronów i fotonów, wykonane kodem PENELOPE. Ponadto Autor mierzy liczbę fotonów K- α w funkcji grubości parylenu naniesionego na płytkę miedzianą. Z tych pomiarów określa współczynnik absorpcji oraz energię gorących elektronów. Przez obliczenie ilorazu liczby fotonów K- α do liczby gorących elektronów Autor był w stanie oszacować współczynnik konwersji energii lasera na liczbę szybkich elektronów, która mieściła się w zakresie od 10^{-4} do $4 \cdot 10^{-4}$. Z pomiarów emisji jonów wykonanych pod różnymi kątami, w zakresie od 0 do 60 stopni, Autor przedstawił czasoworozdzielcze pomiary sygnałów z detektorów jonowych, mierzonych pod różnymi kątami oraz kątowych rozkładów gęstości ładunku jonów zmierzonych przy różnych promieniach ogniska laserowego, z których wyciągnął kilka ważnych wniosków takich jak np. różnice w liczbie jonów termicznych, współczynnikach absorpcji i różnice w energiach szybkich jonów i jonów termicznych. Autor wzbogaca swoje pomiary o dwuwymiarowe symulacje, przeprowadzone w oparciu o wcześniej wspomniany kod ATLANT-HE, wykonane przez prof. Demchenko z Instytutu Fizycznego im.

Lebedeva w Moskwie, co pozwoliło lepiej zrozumieć transport energii lasera do fali uderzeniowej w plazmie ablacyjnej i umożliwiło oszacowanie między innymi całkowitego, rezonansowego współczynnika absorpcji. Pomiary te udowodniły znacznie większy współczynnik absorpcji całkowitej w przypadku obecności pre-impulsu w porównaniu do przypadku jego braku.

Drugą część swoich badań, zawartych w rozprawie doktorskiej, Autor przedstawia w rozdziale szóstym. Eksperymenty te związane są ze wstępnymi badaniami spontanicznych pól magnetycznych powstałych w plazmie laserowej, przeprowadzonych za pomocą femtosekundowego polaro-interferometru. Obrazy polaryzacyjne i interferometryczne rejestrowano przy użyciu impulsu laserowego o podstawowej długości fali, oddziałującego z tarczami z polimeru i z miedzi, dla opóźnień w zakresie od -100 ps do 200 ps (odniesionych do maksymalnej intensywności impulsu laserowego). Autor przedstawia sekwencje obrazów polaryzacyjnych wraz z odpowiednimi do nich interferogramami i z tzw. złożonymi interferogramami (ang. complex interferograms), z których to, przy wcześniejszym dokładnym przedstawieniu metodologii przetwarzania danych pomiarowych, uzyskał informacje o przestrzennym rozkładzie pola magnetycznego w plazmie. Rozkład tego pola porównał następnie z gęstością elektronową i badał je dla różnych czasów w trakcie ekspansji plazmy laserowej. Autor określa wartość pola magnetycznego w zakresie MG (mega Gauss) w trakcie oddziaływania impulsu laserowego z tarczą, dodatkowo, przestrzennie lokalizuje to pole w obszarze o dużej gęstości elektronowej, oraz pokazuje, że rozkład spontanicznych pól magnetycznych jest skorelowany z charakterem ekspansji plazmy ablacyjnej (z osiowym lub sferycznym), który zależy od liczby atomowej Z materiału tarczy. W przypadku „lekkiego” materiału tarczy, o małej liczbie atomowej Z , (plastiku) ekspansja ma charakter sferyczny, natomiast dla „ciężkiego” materiału (miedzi), o większej liczbie atomowej Z , plazma ekspanduje osiowo.

W rozdziale siódmym Autor przedstawia wnioski końcowe i udowadnia hipotezę pracy. Autor również przedstawia punkt po punkcie bardzo precyzyjnie swój wkład w badania przedstawione w jego rozprawie oraz wymienia swoje osiągnięcia techniczne, badawcze i naukowe bazujące na eksperymentach przedstawionych w rozdziałach 5 i 6.

W moim przekonaniu Autor pokazał możliwości wykorzystania femtosekundowej interferometrii wielokadrowej i polaro-interferometrii w badaniach plazmy laserowej. Jednym z najważniejszych osiągnięć jego pracy jest wykazanie możliwości uzyskania rozkładów gęstości elektronowej i profili przestrzennych spontanicznych pól magnetycznych dzięki zastosowaniu femtosekundowej polaro-interferometrii, zmierzonych w trakcie oddziaływania promieniowania laserowego z tarczą; badania, które nie zostały jeszcze opublikowane w literaturze, które są ważne i są nowatorskie w aspekcie badań nad plazmą laserową. Ponadto, przedstawione dane eksperymentalne i wnioski wyciągnięte z pomiarów

interferometrycznych potwierdzają wyniki uzyskane za pomocą pomiarów spektroskopowych, pomiarów szybkich elektronów i jonów, a także są zgodne z symulacji numerycznymi.

Podsumowując, chciałbym jasno stwierdzić, iż moim zdaniem Autor wypełnił cele swojej pracy doktorskiej oraz udowodnił jej tezę. Uzyskane przez Autora wyniki są bardzo ważne z punktu widzenia nowoczesnej ultraszybkiej diagnostyki plazmy do badania oddziaływania promieniowania laserowego z materią, nie tylko w aspekcie ICF, ale w badaniach związanych z plazmą w ogólności. Wyniki przedstawione w niniejszej pracy doktorskiej są opublikowane, przy współautorstwie Autora, w 8 publikacjach z lat 2012-2015, z czego 6 zostało opublikowanych w czasopiśmie z listy filadelfijskiej, takich jak *Physics of Plasmas and Laser and Particle Beams*, które, w czasie publikacji, miały współczynnik IF (ang. impact factor) równy odpowiednio 2.14 i 1.3. Obecnie liczba cytowań Autora wynosi 20 (odn. [16] - 14, odn. [22] - 1, odn. [23] - 5, na podstawie bazy Scopus) z trzech publikacji jego współautorstwa. Inne prace dotychczas nie zostały jeszcze cytowane, jednak jest to związane z faktem, iż wszystkie publikacje ukazały się niedawno. Trochę niezadowolający jest jednak fakt, iż żadna z wymienionych przez Autora prac nie została opublikowana z jego nazwiskiem jako głównego autora. Jedynie w pracy [62] jest on pierwszym i jedynym autorem, jednakże praca ta jest jedynie referatem wygłoszonym przez Autora podczas konferencji Plazma w Warszawie w 2015 roku. Rozumiem jednak, iż większość materiału w jego rozprawie jest na tyle nowa, w szczególności pomiary pól magnetycznych, zatem wierzę, iż w niedalekiej przyszłości materiał ten będzie opublikowany i firmowany przez Autora rozprawy.

Rozprawa jest przygotowana bardzo starannie i została napisana w całości (oprócz dwóch abstraktów) w języku angielskim, co może przyczynić się do jej szerszego odbioru w środowisku naukowym. Wyniki eksperymentalne i numeryczne zostały przedstawione w sposób jasny i odpowiedni, cytując prace naukowe Autora i jego grupy, nie pomijając przy tym również prac innych badaczy. Wnioski są jasne i przekonujące.

Jestem pod ogromnym wrażeniem ilości i jakości pracy naukowej oraz prezentowanych danych, jednakże, jako recenzent, muszę podkreślić również pewne mankamenty rozprawy, na które natknąłem się w trakcie lektury tej pracy. Język angielski w pracy wymaga drobnych poprawek, wyeliminowania literówek i błędów redakcyjnych, str. 29 - równanie 4.2 "l" powinno być "L", str. 44 - zgodnie z regułami różniczkowania $d_{ne}(z)/dz = -n_0/L$, a nie $+n_0/L$, str. 34 - Evolution jest laserem Nd: YLF, więc jego druga harmoniczna jest na długości fali 523 nm lub 526 nm, a nie 532 nm, jak w Nd:YAG, str. 60, str. 61, str. 109 - w tekście: "times of expansion: 0, 200, 600 ps" powinno być "0, 300, 600 ps", opóźnienia czasowe na interferogramach są przedstawione z dokładnością do 1 ps, jednakże dokładność synchronizacji to +/-100 ps. Czy jest zatem uzasadnione przedstawianie opóźnienia pomiędzy kadrami "t" z dokładnością 1 ps? Rysunek

5.22b - rysunek wskazuje serię danych dla $RL = 220 \mu\text{m}$, a nie $200 \mu\text{m}$, str. 67 - RL we wzorze 5.4 powinno być RL , (J) i (ns) , powinny zostać usunięte, gdyż jednostki są już wspomniane w tekście, natomiast ich obecność sugeruje zależność funkcyjną $E = f(J)$ i $\tau = f(ns)$, str. 68 - objętość krateru powinna być wyrażona w $[\text{cm}^3]$, a nie $[\text{cm}^{-3}]$, str. 70 - rys. 5.27b - T_e powinno być wyrażone w $[\text{eV}]$, str. 82 - rys. 5.37b - T_e powinno być również wyrażone w $[\text{eV}]$, inaczej symulacje pokazują, iż plazma ma zbyt wysoką temperaturę, str. 113 – objętość kraterów była 6-8x większa, jednak do pomiaru objętości autor użył różnych metod, tj. na rys. 5.24 (poprzez replikację) oraz na rys. 5.60 / 5.61 – użył mikroskopu 3-D Hirox. Metoda replikacji może w rezultacie dać mniejsze objętości. Czy Autor sprawdził starsze pomiary (metodą replikacji) i zmierzył dla pewności te kratery również za pomocą mikroskopu Hirox? Str. 116 - "fast electron population peaking at $RL=150 \mu\text{m}$ ", z rys. 5.65b faktycznie maksimum jest przy $RL = 100 \mu\text{m}$..., Str. 131 - równanie 6.11 - powinna mieć Δf_B , f_B , a nie f_ϕ . 132 - $B_\phi(r, z)$ obliczono z równania 6,10, a nie 6.11, str. 137 – Autor we wnioskach stwierdza, iż zwiększenie SMF idzie w parze ze zwiększeniem liczby atomowej Z tarczy; może to budzić wątpliwości z dwóch powodów: parylen - $\text{C}_8\text{H}_7\text{Cl}$ nie jest materiałem jednorodnym i nie składa się z jednego pierwiastka, jak miedź, po drugie sprawdzono to tylko dla dwóch tarcz (dwóch Z). Zatem, dla przejrzystości, można zadać pytanie: dlaczego nie został użyty inny/dodatkowy materiał, taki jak grafit ($Z = 6$), Mg ($Z = 12$) Al ($Z = 13$) lub Si ($Z = 14$)? Moim zdaniem, te drobne uchybienia powstały jednak raczej przez nieostrożność podczas prac redakcyjnych i edycyjnych, a nie ze względu na brak kompetencji i nie miały negatywnego wpływu na osiągnięte i przedstawione w niniejszej rozprawie wyniki badań.

Uważam, iż przedstawione w rozprawie wyniki badań są imponujące, są na światowym poziomie, i są dowodem ogromnego zaangażowania i ilości pracy poświęconej przez Autora. Na podstawie treści rozprawy, mogę powiedzieć, iż przedstawione w pracy badania wymagały od Doktoranta dogłębnego zrozumienia zjawisk i opanowania szerokiego zakresu wiedzy z różnych dziedzin nauki, takich jak fizyka plazmy, optoelektronika, optyka, fotonika i materiałoznawstwo. Ta wiedza pozwoliła Autorowi na przeprowadzenie badań, analizę i przetwarzanie danych pomiarowych oraz stawianie hipotez badawczych i w następstwie ich logiczne i naukowo uzasadnione weryfikowanie.

Z pełnym przekonaniem uważam, iż przedstawione w pracy wyniki badań spełniają w zupełności wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie magistra Romana Dudźaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz, z uwagi na wysoki poziom merytoryczny rozprawy, wnioskuję o wyróżnienie jego pracy doktorskiej.

dr hab. inż. Przemysław Wachulak