

Dr hab. Prof. PRz Vitalii Dugaev
Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej
Politechniki Rzeszowskiej
Al. Powstańców Warszawy 6
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 10 kwietnia 2014 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr. Tatyany Sizyuk
pt. "Modeling and simulation of laser produced plasma sources
for EUV photons generation"**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pani Tatyany Sizyuk są zjawiska laserowego generowania plazmy dla wykorzystania w jakości źródła promieniowania w zakresie nadfioletu w granicach długości fal 10-15 nm. Wykorzystanie promieniowania w tym przedziale widma elektromagnetycznego (nazywanym także ekstremalnym nadfioletem) jest teraz uważane za najskuteczniejszą metodą stosowaną do celów litografii mikrochipów półprzewodnikowych, ponieważ metoda ta pozwala na produkowanie układów półprzewodnikowych o rozmiarach nanoskopowych.

Praca doktorska Pani Tatyany Sizyuk składa się z trzech najważniejszych części: rozdział 1 – Wstęp, rozdział 2 – Opis wykorzystanych modeli i metod, rozdział 3 - Modelowanie, analiza i optymalizacja procesu laserowego generowania plazmy – w tym rozdziale są przedstawione najważniejsze wyniki symulacji komputerowych, ich analiza, dyskusja oraz zostały omówione możliwości optymalizacji pewnej wybranej metody generowania plazmy LPP (Laser Produced Plasma method). Na końcu pracy doktorskiej przedstawiono także podsumowanie wyników, lista publikacji i uczestnictwa w konferencjach naukowych, oraz lista cytowanych prac.

Praca doktorska została wykonana na Uniwersytecie Purdue w USA pod kierunkiem profesora Ahmeda Hassaneina, zawiera 120 stron bardzo dobrze napisanego tekstu, 1 tabelę i 93 wspinałych rysunków. Bibliografia obejmuje 68 pozycji literaturowych, w tym także raporty techniczne na ten temat powstałe w Argonne National Laboratory. Jak widać z podanej listy publikacji, recenzowana rozprawa doktorska jest głównie oparta na pięciu artykułach Autora w czasopismach naukowych z listy filadelfijskiej o wysokiej punktacji, w tym: Physics of Plasmas – 2 publikacje, Journal of Applied Physics – 2 publikacje, oraz Advances in Applied Plasma Physics – 1 publikacja. Prócz tego, najważniejsze wyniki były przedstawiane na 7 konferencjach międzynarodowych w Japonii, Egipcie i Stanach Zjednoczonych.

W rozdziale 1 (rozdział wstępny) szczegółowo opisano historię i znaczenie wykorzystania metody litografii ekstremalnego nadfioletu (EUVL), wyjaśniono dlaczego

jest używana ta metoda, przedstawiono opis i porównanie różnych źródeł wypromieniowania w przedziale 10-15 nm, takich jak Discharge Produced Plasma – DPP, Laser Produced Plasma – LPP, i Laser-Assisted Discharge Produced Plasma – LDP. Dalej w tym rozdziale opisano zagadnienie modelowania komputerowego dla źródła LPP w celu optymalizacji jego parametrów. W rozwinięcie tej dyskusji przedstawiono najważniejsze cele i motywacje pracy doktorskiej. Głównym celem tego rozdziału jest szczegółowy opis i rozpatrzenie laserowego generowania plazmy w różnych konfiguracjach i rozwiązywanie pewnych problemów wykorzystania metody LPP.

Modelowanie komputerowe oparte jest na różnych modelach generowania plazmy, analizy systemów LPP oraz wykorzystaniu i rozwinięciu możliwości pakietu HEIGHTS, którego Autorka recenzowanej rozprawy jest współtwórczyni.

W rozdziale 2 doktorant opisuje modele i metody, które są wykorzystane i włączone do pakietu programów komputerowych. Model matematyczny dynamiki plazmy składa się z pewnego zestawu równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych. Równania różniczkowe opisują hydrodynamikę plazmy i wyznaczają zachowanie gęstości masy, energii i pędu. W równaniach zachowania energii przyjmuje się, że całkowita energia układu składa się z energii elektronowej (czyli energii termicznej elektronów plus energia jonizacji) i jonowej, z uwzględnieniem także energii kinetycznej ruchu plazmy. Przy zachowaniu energii całkowitej przyjmuje się, że strumień ciepła może być także związany z gradientem temperatury komponenty elektronowej i jonowej. Oprócz tego, energia jest częściowo wypromieniowana a częściowo generowana ze źródła laserowego.

Opisane są modele i metody obliczenia absorpcji i odbicia energii laserowej w stanie materii skondensowanym, ciekłym, gazowym i w warstwie plazmowej. Szczegółowo opisane są różne modele transportu energii przez wypromieniowanie. Głównym celem tych obliczeń jest odnalezienie strumienia promieniowania plazmy w zależności od kierunku i od wybranych parametrów, a także rozkład spektralny promieniowania nadfioletu.

Cały rozdział 2 zawiera dość dużo matematyki w postaci równań różniczkowych, ich wyprowadzenie i analizę ich związków między sobą, co jest niezbędne dla wykorzystania w/w pakietu oprogramowania komputerowego. Dla sprawdzenia tego, jak działa cała metoda symulacji komputerowych przeprowadzono testowanie w przypadku znanych parametrów i danych literaturowych. Testowanie uwzględnia zarówno dane własnych obliczeń, znanych danych teoretycznych oraz wyników eksperymentalnych. Jak widać z przedstawionych danych, wyniki symulacji komputerowych bardzo dobrze opisują parametry efektywności konwersji energii laserowej dla wzbudzenia plazmy i jej wypromieniowania w przedziale ekstremalnego nadfioletu.

Rozdział 3 przedstawia wyniki symulacji komputerowych laserowego generowania plazmy. Na przykład, przeprowadzono badanie wpływu długości fali lasera na efektywność przetwarzania energii (CE). Okazało się, że optymalny reżym odpowiada intensywności lasera $5 \cdot 10^{10}$ W/cm² przy długości fali 1064 nm, co jest zgodne z danymi doświadczalnymi. W analogiczny sposób było badano wpływ geometrii 'tarczy'

(sferyczna lub planarna geometria) na ewolucje plazmy i rozkład intensywności promieniowania plazmy.

Sumując wyniki rozdziału 3, można stwierdzić, że badania przeprowadzono w sposób bardzo systematyczny, i przy tym zostało znaleziono dużo różnych ważnych zależności, które opisują optymalny reżym działania układu w zależności od licznych parametrów promieniowania laserowego: intensywności impulsów, rozmiaru obszaru (spot size), czas trwania promieniowania, i innych. Także znaleziono wpływ parametrów, związanych z tarczą, na optymalny wybór parametrów emisji ekstremalnego nadfioletu. Ważnym wynikiem jest to, że optymalne przetwarzanie jest związane z wykorzystaniem podwójnych impulsów laserowych.

Najważniejsze wyniki modelowania komputerowego są przedstawione w podsumowaniu. Należy zaznaczyć, że na podstawie przeprowadzonej analizy i modelowania komputerowego znaleziono możliwości i sposoby optymalizacji metody LPP w celu zwiększenia efektywności przetwarzania energii i zminimalizowania strat.

Cała praca jest bardzo dobrze napisana, a przedstawione wyniki są bardzo dobrze pokazane i opisane. Dlatego nie mam wątpliwości co do wiarygodności tych wszystkich wyników.

Niemniej jednak, muszę zaznaczyć w jakości uwagi krytycznej, że wykorzystana metoda matematyczna w rozdziale 2 ma pewne ograniczenia, przede wszystkim związane z wykorzystaniem pewnego przybliżenia dla zależności różnych zmiennych w równaniach różniczkowych od parametrów materiałów, temperatury, itd. Na przykład, strumień ciepła w wykorzystanym przybliżeniu jest proporcjonalny do gradientu temperatury. Jednak w przypadku dużych gradientów ten związek już nie jest związkiem liniowym. Analogicznie, współczynnik absorpcji promieniowania został wybrany zgodnie z teorią zderzeniowego mechanizmu absorpcji, ale w różnych warunkach mogą występować także i inne mechanizmy absorpcji. Dlatego moim zdaniem, należało w pracy doktorskiej krytycznie przedstawić fizyczne modele, na których opiera się modelowanie i wskazać ograniczenia ich możliwego wykorzystania.

Konkluzja

Reasumując, pragnę stanowczo stwierdzić, iż wymienione powyżej z obowiązku recenzenta mankamenty rozprawy Pani mgr Tatyany Sizyuk nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę tej pracy. Rozprawa napisana jest w swojej zasadniczej części jasno i zrozumiale.

Szczegółowe zapoznanie się z treścią rozprawy oraz pokaźny dorobek naukowy Pani mgr utwierdziły mnie w przekonaniu o jej wysokich kwalifikacjach. Praca doktorska Pani mgr Tatyany Sizyuk, wykonana pod opieką naukową promotora - Pana Profesora Ahmeda Hassaneina - jest oryginalnym rozwiązaniem kilku zagadnień naukowych, stanowiących istotny wkład do obszaru wiedzy, który można określić jako ilościową i jakościową

analizę specyficznej plazmy laserowej w jej zastosowaniu do celów litografii w zakresie nadfioletu.

Pokazuje ona także jej ogólną wiedzę w dziedzinie nowoczesnej fizyki plazmy, fizyki laserów, algorytmiki, symulacji komputerowych z wykorzystaniem potężnych narzędzi w postaci pakietu oprogramowania HEIGHTS, którego Pani mgr jest współtwórczyni. Rozprawa charakteryzuje się indywidualnym wkładem Autora do rozwiązania omówionych wyżej zagadnień, a zatem spełnia wszystkie wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych. Niniejszym wnoszę zatem o dopuszczenie Pani mgr **Tatyany Sizyuk do dalszych kroków przewodu doktorskiego.**

