

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Tatyany Sizyuk

*Modelling and simulation of laser produced plasma sources
for EUV photons generation*

Tematem rozprawy doktorskiej mgr Tatyany Sizyuk jest modelowanie oddziaływania wiązki laserowej z materiałem i wytwarzania drobiny plazmy jako źródła światła w skrajnym ultrafiolecie. Źródła promieniowania w skrajnym ultrafiolecie są rozwijane dla zastosowań w litografii. Badania zostały wykonane w Center for Materials under Extreme Environment, School of Nuclear Engineering, Purdue University. Opiekunem rozprawy doktorskiej jest prof. Ahmed Hassanein z Purdue University.

Dla uzyskania jak najlepszej rozdzielczości w litografii należy używać źródeł o możliwie krótkiej długości fali. Taką możliwość daje emisja promieniowania z gorącej plazmy cyny w skrajnym ultrafiolecie, w paśmie 13.5nm. Jedną z metod otrzymywania plazmy jest zastosowanie światła laserowego. Optymalizacja układu eksperymentalnego ma zapewnić jak największą wartość współczynnika zamiany energii na światło ultrafioletowe (CE). Zastosowania technologiczne wymagają zachowania niewielkich rozmiarów źródła. Ważne jest też ograniczenie emisji jonów z tarczy. Tworzenie dużej ilości szybkich jonów może prowadzić do zniszczenia układu optycznego. Litografia z użyciem promieniowania ultrafioletowego jest bardzo ważnym działem badań w technologiach produkcji układów scalonych. Wydajne źródła promieniowania ultrafioletowego będą miały wiele zastosowań komercyjnych. Badania Pani Tatyany Sizyuk obejmują modelowanie i optymalizację plazmowego źródła światła ultrafioletowego.

Praca zaczyna się od rozdziału wprowadzającego w tematykę związaną z projektowaniem źródeł światła dla litografii. Autorka przedstawia i uzasadnia cel badań nad plazmowym źródłem światła. Kolejny, obszerny rozdział pracy poświęcony jest opisowi modelowania oddziaływania światła z tarczą i dynamiki źródła plazmowego. Autorka opisuje założenia fizyczne modeli. Podstawowe równania opisują transport materii, pędu i energii w ośrodku. Inne aspekty fizyczne zjawiska to oddziaływanie promieniowania z materia, absorpcja światła laserowego, ewaporacja materii z powierzchni tarczy, ewolucja hydrodynamiczna plazmy. Dokładnie opisane jest modelowanie transportu promieniowania poprzez metodę Monte Carlo lub poprzez metodę elementów skońc-

zonych. Na końcu model pozwala na obliczenie najważniejszego dla nas parametru, współczynnika konwersji CE. Wszystkie te elementy modelu teoretycznego wchodzi w skład pakietu numerycznego HEIGHTS, rozwijanego w CMUXE. Autorka specyfikuje swój indywidualny wkład w rozwój programów. Pracowała nad szerokim spektrum zagadnień takich jak ewaporacja, hydrodynamika plazmy, pisanie kodu równoległego, erozja i dyfuzja materiału. Model numeryczny został przetestowany i porównany z wynikami eksperymentów.

Pakiet symulacyjny HEIGHTS jest podstawowym narzędziem wykorzystanym w pracy badawczej przedstawionej w rozprawie. Zadaniem postawionym przez grupę z CMUXE jest testowanie i optymalizacja konfiguracji źródła plazmowego. Dla tego celu wykonano bardzo wiele różnych obliczeń, uwzględniając różne możliwości konstrukcji źródła. Rozważano wzbudzenie plazmy przez laser Nd o długości fali 1064nm i laser gazowy CO₂ o długości fali 10.6μm. Dla lasera Nd możliwe jest też użycie wiązek z wyższych harmonicznymi o długościach fal 266, 355, oraz 532nm. Badanie zależności CE od długości fali lasera pokazuje, że najlepsze wyniki otrzymujemy dla długości fali 1064nm i natężenia 5 10¹⁰W/cm². Porównanie pochłaniania wiązki laserowej dla tarczy płaskiej i tarczy w kształcie kropli pokazuje, że płaska tarcza ma trochę lepszy CE. Mapy emisji promieniowania z plazmy pokazują, że najważniejszy przyczynek do emisji pochodzi od obszaru w pobliżu powierzchni tarczy. Badanie zależności współczynnika konwersji od rozmiaru plamki lasera wskazuje, że łatwiej jest uzyskać wysoki CE dla dużych rozmiarów plamki. Jest to związane z mniejszym wpływem ekspansji hydrodynamicznej plazmy w większym źródle.

Ciekawym pomysłem jest wzbudzenie plazmy przez trzy wiązki lasera usatwione względem siebie pod kątem. Najlepsze wyniki otrzymuje się dla kąta 30°, wtedy współczynnik konwersji osiąga 2.2%. Mapy rozkładu temperatury dla tej konfiguracji wiązek laserowych potwierdzają osiągnięcie wysokich temperatur na małym obszarze tarczy.

Plazma może być wytworzona przez laser Nd lub laser molekularny CO₂. Rachunki pokazują, że laser Nd pozwala na osiągnięcie większych współczynników konwersji. Jest to związane z dłuższym trwaniem impulsu lasera gazowego CO₂. Wiązka laserowa tylko w pierwszym etapie tworzy plazmę z materiału tarczy. Plazma wytworzona przez laser Nd ma większą gęstość w zakresie temperatur potrzebnych do emisji w skrajnym ultrafiolecie. Dla lasera CO₂ zauważono dużą zależność CE od kształtu i wielkości tarczy. Wydajność wyraźnie się zmniejsza dla sferycznej tarczy i ze zmniejszaniem jej rozmiaru. Natomiast dla lasera Nd możliwe jest użycie mniejszego źródła dzięki silniejszemu pochłanianiu światła lasera w plazmie.

Bardzo obiecującą metodą zwiększenia współczynnika konwersji jest użycie podwójnego pulsu laserowego, przy czym pierwszy impuls trwa bardzo krótko i może wykorzystywać światło o krótszej długości fali. Ciekawe wyniki otrzymuje się używając jako pierwszego impulsu wyższych harmonik lasera Nd o czasie trwania 20ns. Drugi impuls lasera CO₂ oddziałuje z podgrzaną plazmą. Można osiągnąć wartości CE powyżej 2%. Symulacje pokazują, że plazma wytworzona przez pierwszy impuls pochłania światło po odbiciu, co zwiększa wydajność konwersji.

Masa wyparowanego materiału tarczy rośnie z natężeniem i czasem trwania impulsu. Ilość wyparowanego materiału jest większa, jeśli pierwszy impuls pochodzi od światła o krótszej długości fali. Pozwala to na użycie krótkiego impulsu laserowego, plazma ma niższą temperaturę i emituje mniej szkodliwych, szybkich jonów. Różnica w energii jonów jest spektakularna, dla układu z podwójnym impulsem lasera jony mają energię 30eV, a dla pojedynczego impulsu nawet 3000eV. Wyniki obliczeń potwierdzone są danymi eksperymentalnymi. Obliczenia pozwoliły na ustalenie optymalnego rozmiaru plamki lasera głównego pulsu i jego opóźnienia. Wynik symulacji sugeruje użycie pierwszego impulsu o długości fali 266nm, opóźnienia 300-400ns dla drugiego impulsu i kropli tarczy o rozmiarze 20-30μm.

Rozprawa przedstawia szeroki wachlarz wyników symulacji zachowania plazmowego źródła światła ultrafioletowego. Temat badawczy jest ważny, jest powiązany z aktualnymi eksperymentami i może mieć istotne technologiczne zastosowania. Autorka przeprowadziła wiele symulacji zmieniając układ fizyczny (rozmiar, kształt), czasy i rodzaje impulsu laserowego, natężenie i długość fali impulsu. Wynikiem analizy jest propozycja używania podwójnego pulsu laserowego o różnych długościach fali. Taki układ pozwala na uzyskanie źródła ultrafioletowego o dużej wydajności, małych rozmiarach, produkującego niewielkie ilości energetycznych jonów.

Główny zarzut jako recenzenta dotyczy samej redakcji pracy. Tekst jest napisany w sposób bardzo niespójny. Wstęp jest napisany przystępnie, ale zawiera sporo błędów językowych. Przedstawienie wyników symulacji jest oparte na publikacjach z udziałem Pani Tatyany Sizyuk. Wszystkie rysunki, a także spora część tekstu są wzięte z opublikowanych prac. W wielu kolejnych rozdziałach powtarzają się, w sposób niespójny, elementy dyskusji motywacji badań, np. dlaczego ograniczamy emisję jonów. Praca zyskałaby wiele na starannym przeredagowaniu i spójnym pokierowaniu dyskusji i opisu badań. Uważam, że lepiej byłoby przedstawić kolekcję oryginalnych prac poprzedzonych krótkim wstępem w trybie ustawy z dn. 18 marca 2011 r..

Moje zarzuty dotyczą samej strony redakcyjnej tekstu. Różnorodne wyniki naukowe

otrzymane przez Panią Tatyane Sizyuk są ciekawe i ważne. Jestem przekonany, że znajdują zastosowanie przy budowie laserowych źródeł ultrafioletowych dla litografii. Autorka rozprawy potwierdziła swoją znajomość tematyki i umiejętność przeprowadzenia symulacji. Jest współautorką wielu prac z zakresu tematyki rozprawy doktorskiej. Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Tatyane Sizyuk do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Piotr Bożek

