



dr hab. Maciej Szkulmowski, prof. UMK

maciej.szkulmowski@fizyka.umk.pl

tel.: 56 611 3213

Toruń, 7 czerwca 2021

Recenzja rozprawy doktorskiej magister Weroniki Lamperskiej pt. „Opracowanie nowych metod badawczych dla jedno- i dwulaserowej pęsety optycznej”

Przedstawiona praca doktorska magister Weroniki Lamperskiej dotyczy rozwoju metod metrologicznych z wykorzystaniem pęsety optycznej oraz mikronarzędzi optymalizowanych do konkretnych zastosowań metrologicznych. Autorka stawia trzy tezy badawcze, w których postuluje, że metrologiczna wartość pęsety optycznej może być rozszerzona poprzez zastosowanie dwóch wiązek laserowych, poprzez zastosowanie odpowiednio dobranego mikronarzędzia oraz, że dodatkowe możliwości daje zastosowanie wirów optycznych. W celu dowiedzenia tych tez Autorka proponuje szereg metod pomiarowych sprofilowanych pod konkretne zastosowania, przeprowadza ich eksperymentalną walidację oraz dyskusję uzyskanych wyników.

Układ pracy doktorskiej jest czytelny i przejrzysty, zawiera ona 157 stron podzielonych na r rozdziałów (w tym 3 rozdziały merytoryczne), bogaty spis literatury zawierający ponad 200 pozycji oraz wykaz dorobku naukowego. Praca napisana jest w języku polskim i poprzedzona streszczeniami w dwóch wersjach językowych (polskim i angielskim).

Rozdział pierwszy (Wprowadzenie) wprowadza czytelnika w tematykę pracy doktorskiej przedstawiając zarys pracy i wymieniając tezy rozprawy.

Rozdział drugi (Część teoretyczna) skupia się na zjawisku pułapkowania optycznego. W pierwszym podrozdziale Autorka podaje historyczne tło zjawiska wraz z dynamiką rozwoju technologii. Następnie opisuje teoretyczne podstawy mechanizmu pułapkowania optycznego w reżimie mikro- i makroskopowym. Dodatkowo pokazuje też podstawowe pola zastosowań pułapkowania optycznego. W drugim podrozdziale skupia się na zastosowaniu pułapek optycznych jako optycznych manipulatorów czyli pęset optycznych. W szczególności opisuje główną cechę pęsety, czyli sztywność oraz pokazuje metody jej wyznaczania. Następnie przechodzi do opisu różnych rodzajów pęset optycznych. W trzecim podrozdziale opisuje wiry optyczne, ich wytwarzanie, zastosowania w pułapkach i przekazywania momentu pędu z wiru optycznego do pułapkowanych obiektów. W ostatnim podrozdziale ramowo opisana jest też technika fotolitografii dwufotonowej, którą wykorzystywano w wytwarzaniu mikronarzędzi używanych przez Autorkę w części



eksperymentalnej. Choć rozdział w dość dobry sposób podaje zakres wiedzy niezbędnej do zrozumienia zagadnień poruszanych dalej w pracy, to mam kilka drobnych uwag:

1. W części rozdziału dotyczącej pułapkowania optycznego w ramach jednego podrozdziału zawarto historię zjawiska z dynamiką rozwoju technologii, teoretyczny opis zjawiska oraz zastosowania. Rozdzielenie tych różnych jakościowo tematów poprzez utworzenie osobnego podrozdziału z opisu mechanizmu pułapkowania rozjaśniłoby układ pracy.
2. W teoretycznym opisie pułapkowania z wykorzystaniem dwóch reżimów dla kulek o różnej wielkości pomogłoby uzupełnienie ilustracji o oznaczenie kierunków i zwrotów układu współrzędnych, w którym dokonywany jest opis oraz oznaczenie kierunku biegu światła.
3. Brakuje określenia granic stosowalności pułapki. Na przykład, czy możliwa jest taka kombinacja geometrii wiązki i jej natężenia, w której siła wypadkowa wypycha pułapkowany obiekt z pułapki lub jest zbyt słaba by zrównoważyć inne siły zewnętrzne działające na obiekt.
4. W opisie metod pomiaru sztywności Autorka skupiła się na metodach pasywnych, metody aktywne traktując bardzo zdawkowo. Powinny być one zdecydowanie szerzej opisane. Tym bardziej, że Autorka proponuje później własną wersję aktywnej metody opornościowej.

Rozdział trzeci (Układy pęsety optyczne wykorzystane w pracy) opisuje instrumentarium optyczne wykorzystywane przez Autorkę w części eksperymentalnej. W rozdziale tym opisany jest układ pęsety optycznej zbudowanej i oprogramowanej przez innych członków Laboratorium Manipulatorów Optycznych Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej, który w wyniku prac i koncepcji autorki ewoluował w kierunku układów bardziej zaawansowanych. W szczególności układy wyposażone zostały w drugą wiązkę laserową oraz generator pozwalający na modulowanie natężenia jednej lub obu wiązek w czasie. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie eksperymentów z oscylującymi kulkami. Rozdział w klarowny sposób pozwala zrozumieć zasadę działania i sposób wykorzystania zbudowanych układów optycznych. Mam natomiast następujące uwagi:

1. Nie do końca jasny jest zakres wkładu Autorki w rozbudowę układu. W jakim stopniu jej wkład był koncepcyjny a na ile uczestniczyła w projektowaniu, składaniu i ustawianiu układu optycznego czy tworzeniu oprogramowanie sterującego i analizującego. Z późniejszej lektury rozdziału czwartego wynika, że była ona głównym inicjatorem zmian, ale brakuje jasnego wskazania wkładu.
2. W tym rozdziale pojawia się stosowane przez całą rozprawę określenie „migająca wiązka”. W moim odczuciu jest to określenie mocno żargonowe i choć wygodne w codziennej pracy laboratoryjnej, to mniej raziloby użycie sformułowania nawiązującego do modulacji natężenia.



Rozdział czwarty (Część praktyczna).

Głównym rozdział pracy można podzielić na trzy główne części.

W pierwszej części Autorka opisuje proces prototypowania szeregu mikronarzędzi optymalizowanych do różnych zastosowań. We wszystkich przypadkach Autorka przeprowadzała siedmiostopniową procedurę, od projektu mikronarzędzia do testów. Autorka opisuje w szczególności trzy najlepsze narzędzia, czyli mikrotarany, mikrowiosta oraz mikrosztangi oraz siedem mniej udanych, które okazały się mniej praktyczne na etapie testów i odrzucone lub odłożone do zastosowania na późniejszy okres. W przypadku trzech udanych narzędzi Autorka szczegółowo opisuje próby wykorzystania narzędzi do przeprowadzenia pomiarów własności ośrodka, próbki biologicznej lub własności wiązki pułapkującej.

Dla mikrotarana Autorka pokazała prostą metodę pomiaru lepkości cieczy wykorzystującą pomiar referencyjny (np. względem wody). Metoda wydaje się obiecująca, bo jej zakres stosowalności obejmuje ciecze o lepkości większej niż możliwe do zbadania w przypadku metody z pojedynczą kulką. Podaje też propozycje potencjalnych zastosowań biologicznych inspirowanych literaturą, ale nie zostały one jeszcze przetestowane. Wyniki zostały opublikowane również w czasopiśmie *Micromachines*.

Narzędziem wykorzystanym do badania próbek biologicznych, plemników ludzkich i zwierzęcych oraz mikroorganizmów są stworzone przez Autorkę mikrowiosta. Autorka opisuje napotykaną trudności oraz proces optymalizacji narzędzia w wyniku napotykaną trudności eksperymentalnych. Ta część pracy ukazuje zdolność Autorki do przeprowadzania efektywnego procesu prototypowania w celu optymalizacji narzędzi do konkretnych zastosowań. Proces optymalizacji zakończony jest pomyślnymi wynikami eksperymentalnymi, złożeniem zgłoszenia patentowego oraz pomysłami na kolejne etapy rozwoju narzędzia.

Kolejnym narzędziem szczegółowo opisanym przez Autorkę jest mikrosztanga, która została pomyślana jako narzędzie do badania momentu siły wywieranej przez wiązkę z wirem optycznym. Autorka proponuje cztery metody, w których w bardzo pomysłowy sposób posługuje się możliwościami układu pomiarowego: do pułapkowania wykorzystuje nie tylko główne wiązki pułapkujące (zmodulowane za pomocą przestrzennego modulatora wiązki - SLM), ale również wiązkę traktowaną jako artefaktyczną (zerowy rząd dyfrakcji na SLM) oraz wiązkę z toru zwierciadlanego. Podejście to świadczy o dużych kompetencjach eksperymentalnych Autorki, zwłaszcza, że pomysłowe konfiguracje sprzętowe łączy z różnorodnymi procedurami eksperymentalnymi. Następnie Autorka przechodzi do opisu teoretycznego, wyprowadza analityczne rozwiązanie dla położenia kulki dla oscylującej mikrosztangi i przeprowadza dyskusję ograniczeń zastosowanego modelu. Dla jednej z metod, porównuje otrzymane wyniki



eksperymentalne zarówno z wyprowadzonym, uproszczonym modelem analitycznym jak i numerycznym rozwiązaniem zagadnienia oscylatora. Widoczna jest duża zgodność wyników eksperymentalnych i teoretycznych. Wreszcie, porównuje wyniki pomiaru siły i momentu siły wiru uzyskane czterema metodami. Przeprowadza szeroką dyskusję uzyskanych wyników, ograniczeń metod i źródeł błędów. Wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie *Applied Optics*.

W drugiej części rozdziału Autorka prezentuje dwie autorskie metody wyznaczania lepkości cieczy: metodę oscylującej kulki i metodę wirujących kulek metalicznych.

W przypadku pierwszej z metod Autorka ponownie pokazuje umiejętność opracowania pomysłowego eksperymentu na podstawie przypadkowej obserwacji, opisanie teoretycznie zachodzących procesów i zaprojektowania zoptymalizowanej procedury, w której uzyskała ilościowe wyniki zgodne z wartościami literaturowymi. Zaprojektowana procedura pozwala na wyznaczenie zarówno sztywności pułapki optycznej, czyli jej wykalibrowanie względem cieczy o znanej lepkości, jak i wyznaczanie nieznannej lepkości cieczy. Autorka drobiazgowo roztrząsa czynniki wpływające na otrzymywany wynik, jak np. zmiany wydajności pułapkowania w zależności od zmieniającego się współczynnika załamania badanej cieczy i ich wpływ na otrzymywany wynik. W efekcie stworzona metoda pozwala na pomiary cieczy o dużych lepkościach, nieosiągalne innymi metodami. Opracowaną metodę Autorka wykorzystywała do pomiaru lepkości plazmy nasienia ludzkiego i otrzymała wyniki zbieżne z danymi literaturowymi. Wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie *Optics and Lasers in Engineering*.

Druga z opracowanych przez Autorkę metod wykorzystuje wir optyczny i pozwala na wykorzystanie nieprzezroczystych kulek do pomiaru lepkości, której zwiększanie powoduje spadek prędkości obrotowej kulki w pułapce. Metoda jest bardzo czuła i pozwala na pomiary niewielkich zmian stężenia, w tym na obserwacje procesów takich jak zmiana lepkości ośrodka spowodowana dyfuzją. Autorka testuje metodę w zaprojektowanych przez siebie aranżacjach eksperymentalnych i analizując otrzymane wyniki prezentuje rekonstrukcję procesu dyfuzji w objętości komory. Ponownie Autorka w drobiazgowy sposób analizuje wyniki otrzymywane w poszczególnych etapach eksperymentów oraz projektuje kolejne testy, których zadaniem jest znalezienie odpowiedzi na pojawiające się niejasności, tak długo, aż jest w stanie wytłumaczyć obserwacje. Wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie *Experiments in Fluids*.

W części trzeciej rozdziału Autorka opisuje pęsetę optyczną w pomiarach metrologicznych w biologii: do pomiaru siły niezbędnej do zerwania nici DNA i pomiaru sztywności komórek. Stosuje ją również do eksperymentów z przekazywaniem momentu pędu z wiru optycznego do ferrofluidu, czyli zawiesiny nanocząstek ferromagnetycznych. Wyniki zostały opublikowane w czasopiśmie *Optica Applicata*.



Uwagi:

1. Na etapie projektowania mikronarzędzi brakuje trochę opisu na ile proces projektowania, a konkretnie część koncepcyjna, czyli „wymyślanie” kształtu narzędzia bazował na doświadczeniu i intuicjach Autorki, a na ile był wspomagany np. modelowaniem i optymalizacją konkretnych własności mechanicznych, czy spodziewanych interakcji z ośrodkiem.
2. W porównaniu metod w Tablicy 4.1.1 widać, że metody I, III i IV dają wyniki zgodne, podczas gdy metoda II wyraźnie wyższe. Brakuje trochę wytłumaczenia dlaczego tak może być oraz dyskusji na temat tego, która z tych grup metod jest bardziej wiarygodna.

Praca napisana jest w sposób bardzo czytelny, czyta się ją płynnie i z dużą przyjemnością. Z lektury pracy wyłania się obraz Autorki jako kompleksowo rozwiniętego badacza, który bardzo sprawnie i z dużą pomysłowością projektuje eksperymenty, analizuje wyniki, proponuje ich teoretyczne wytłumaczenie oraz znajduje praktyczne zastosowania. Imponuje również zakres i różnorodność przeprowadzonych prac, które były przeprowadzane przez Autorkę, wskazując na jej umiejętność łączenia w procesie badawczym kompetencji z nanoinżynierii, optyki, analizy danych i biologii. Jest to umiejętność niezwykle cenna we współczesnej, multidyscyplinarnej nauce. Kompletność rozwoju Autorki jako badacza dopełnia umiejętność pozyskiwania środków na badania i samodzielnego prowadzenia badań, czego dowodem jest zdobycie i zrealizowanie Diamentowego Grantu. Warty podkreślenia jest również fakt zgłoszenia niektórych rozwiązań do ochrony patentowej, co świadczy o świadomości konieczności przenoszenia uzyskanych wyników naukowych do otoczenia gospodarczego.

Wyniki otrzymane przez Autorkę zostały zaprezentowane w dziesięciu artykułach z listy JCR (w tym siedem dotyczy bezpośrednio tematyki poruszanej w pracy) oraz czterech materiałach konferencyjnych. W połowie czterech z tych artykułów Autorka była pierwszym autorem. Prace Autorki w ciągu 4 lat osiągnęły 39 cytowań, co pokazuje, że uzyskane przez nią rezultaty zaczynają rezonować w świecie naukowym.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom naukowy i świadczy o dużych umiejętnościach oraz dojrzałości naukowej Weroniki Lamperskiej. Stwierdzam, że spełnia ona wszystkie warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie wnioskuję o uznanie rozprawy doktorskiej za wyróżniającą.

