



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński

Wydział Fizyki

Uniwersytet Warszawski

Ul. Pasteura 5

02-093 Warszawa

e-mail: ryszard.buczynski@fuw.edu.pl

Tel. + 48 22 5532023

Recenzja
pracy doktorskiej
" Opracowanie nowych metod badawczych dla jedno- i dwulaserowej
pęsety optycznej"
mgr inż. Weroniki Lamperskiej

Rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom nad rozwojem nowych technik badawczych opartych na wykorzystaniu koncepcji pęsety optycznej. Praca obejmuje szeroko zakrojony zakres prac eksperymentalnych wspartych opracowanymi modelami matematycznymi, obejmujący rozbudowę układów szczypiec optycznej z wykorzystaniem mikronarzędzi sterowanych optycznie do zastosowań metrologicznych i czujnikowych. Praca powstała pod kierunkiem dr. hab. Jana Masajady, prof. PWr na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

W rozprawie Autorka bada układy złożone z jednej lub kilku optycznych wiązek pulapkujących oraz zaawansowanych mikronarzędzi. To podejście znacząco wykracza poza tradycyjne podejście, w którym szczypce optyczne są stosowane do chwytania prostych mikroobektów: kulek polimerowych, pojedynczych komórek lub niewielkich organizmów. Przedstawiona rozprawa zawiera szczegółowy opis budowy mikronarzędzi oraz sposobów ich zdalnego sterowania wyłącznie przy pomocy światła, bez stosowania elementów mechanicznych. Takie podejście jest aktualnym tematem badawczym rozwijanym w



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

wiodących ośrodkach naukowych na świecie prowadzących badania w zakresie pułapkowania optycznego, a możliwości zastosowania mikronarzędzi sterowanych światłem są obecnie jednym z wiodących tematów badawczych w dziedzinie mikrofluidyki i pułapkowania optycznego. Wyniki przedstawionych badań mogą mieć istotny wpływ na rozwój nowych metod badawczych w chemii, biologii i medycynie, w szczególności do bezinwazyjnego badania pojedynczych komórek.

Praca doktorska mgr inż. Wcroniki Lamperskiej zawiera wyniki opublikowane w latach 2015-21 w 6 artykułach w czasopiśmie z dziedziny optyki indeksowanych przez Web of Science i posiadających wysokie współczynniki IF. Pani Lamperska jest pierwszym autorem w 4 z powyższych publikacji oraz drugim autorem w pozostałych 2 pracach co świadczy o jej kluczowej roli we wszystkich opublikowanych badaniach. Doktorantka jest również współautorką w dwóch publikacji nie związanej bezpośrednio z doktoratem opublikowanych w uznanych czasopiśmie międzynarodowym z IF: *Photonics* w 2020 roku i *Measurement Science and Technology* w 2019 roku oraz jednej publikacji w czasopiśmie *OSA Continuum* indeksowanym przez Web of Science również z 2019 roku. Powyższe prace dotyczą badania właściwości oraz zastosowań wirów optycznych.

Spośród prac w dorobku mgr Lamperskiej na szczególną uwagę zasługują 2 prace. Pierwsza praca została opublikowana w 2021 roku w czasopiśmie *Experiments in Fluids* (IF= 2.335) i przedstawia eksperymentalne wyniki zastosowania wirującej dielektrycznej mikrokulki pokrytej nanowarstwą srebra umieszczonej w wirze optycznym do badania dynamiki dyfuzji roztworów. Druga praca, która została opublikowana w prestiżowym czasopiśmie *Optics and Laser in Engineering* (IF= 4.273) w 2017 roku, zawiera oryginalne wyniki badań dotyczących możliwości zastosowania w metrologii drgań mikrokulki polistyrenowej oscylującej pomiędzy dwoma pułapkami optycznymi. Praca ta została już zauważona przez środowisko, o czym świadczą pierwsze 2 cytowania obecne.

Doktorantka postawiła w rozprawie doktorskiej 3 tezy dotyczące rozszerzenia możliwości pomiarowych pęset optycznych poprzez zastosowanie mikronarzędzi, poszerzenia możliwości pomiarowych w układach dwulascrowej pęsety optycznej w stosunku do układów



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

wykorzystujących pęsetę jednolaserową oraz metrologicznego potencjału transferu momentu pędu z wiru optycznego do mikroobektów. Wszystkie tezy zostały systematycznie zbadane w ramach niniejszej pracy i pozytywnie zweryfikowane.

Praca doktorska mgr inż. Weroniki Lamperskiej składa się z dwóch części. Pierwsza część pracy została podzielona na 2 rozdziały i stanowi wprowadzenie merytoryczne do pracy obejmujące motywację podjęcia tematu, oraz przegląd stanu wiedzy w dziedzinie rozprawy. Druga część pracy, obejmująca rozdziały 3 i 4 oraz wnioski końcowe zawarte w rozdziale 5, przedstawiają oryginalne wyniki badawcze Doktorantki.

Rozdział 1 jest bardzo krótki i stanowi formalny wstęp do pracy, zawiera tezę pracy oraz opis jej struktury. Rozdział 2 zawiera pełny wstęp merytoryczny do pracy obejmujący wszystkie podstawowe pojęcia związane z pęsetą optyczną, wirami optycznymi, fotolitografią dwufotonową niezbędne do zrozumienia dalszej części pracy, opis motywacji podjęcia tematu badawczego oraz stan wiedzy w dziedzinie pęset optycznych i ich stosowania do pułapkowania mikroobektów oraz sterowania. Rozdział stanowi bardzo dobre wprowadzenie do tematyki doktoratu, zawiera liczne odnośniki do aktualnej literatury światowej i pozwala czytelnikowi na szybkie zapoznanie się z aktualnym stanem wiedzy w dziedzinie. Sposób opisu jest przystępny, ale równocześnie precyzyjny i świadczy o dogłębnym zrozumieniu przez Autorkę tematyki i stanu wiedzy. W rozdziale 2.2.2. Doktorantka przedstawiła bardzo interesujący opis rodzajów pęset optycznych opisujących stan wiedzy w tej dziedzinie. Opis jest wyczerpujący choć ze względu na brak rysunków ilustrujących opisywane pęsety bardzo trudny do zrozumienia dla niespecjalisty.

Rozdział 3 zawiera opisy układów pęset optycznych użytych przez Doktorantkę w dalszych pracach badawczych przedstawionych w rozprawie. W rozdziale przedstawiono opis jednolaserowej holograficznej pęsety która jest rozbudowywana na Politechnice Wrocławskiej przez zespół badawczy dr hab. S. Drobczyńskiego oraz układy w których rozbudowie brała czynny udział doktorantka: dwulaserowa holograficzna pęseta optyczna z migającą wiązką oraz półholograficzna dwulaserowa pęseta optyczna z migającymi wiązkami. Dotychczas niewiele prac badawczych było poświęcone układom z migającym pułapkowaniem



optycznym, z tego powodu prowadzone prace stanowią wartościowy wkład do stanu wiedzy. Przedstawione opisy są bardzo precyzyjne, zawierają wszystkie szczegóły techniczne i merytoryczne potrzebne do zrozumienia działania pułapek dwulaserowych. Ta część pracy ma dodatkowo wysoki walor edukacyjny. Jedynym mankamentem powyższego rozdziału jest brak informacji o natężeniach wiązek pułapek optycznych możliwych do wygenerowania przez przedstawione układy.

Rozdział 4 przedstawia opis metod badawczych, opracowane modele oraz wyniki eksperymentalne i ich analizę otrzymane przez Doktorantkę. W rozdziale 4.1. mgr Lamperska przedstawiła opis projektowania, wykonania i analizę działania mikronarzędzi wykonanych techniką fotolitografii wielofotonowej. Przedstawiono motywacje wykonania narzędzi, sposób ich sterowania oraz wyniki charakteryzacji eksperymentalnej. W pracy przedstawiono szereg oryginalnie opracowanych i wykonanych przez Doktorantkę mikronarzędzi: tarany, wiosła, sztangi, wirniki, itp. Część z nich jest inspirowana danymi literaturowymi, część w pełni oryginalnymi koncepcjami Doktorantki.

Jednym z najbardziej udanych mikronarzędzi był układ sztangi z trzema kulkami umożliwiającymi jego pełną kontrolę i sterowania optyczne. W rozdziale 4.1.3 Doktorantka wprowadziła opis 4 konfiguracji sterowania mikrosztangą, które umożliwiają skokowy lub ciągły ruch obrotów mikronarzędzi, lub elastyczne zwalnianie i przyspieszanie obrotów przy zastosowaniu dwóch lub trzech pułapek optycznych stałych lub migających. Są to niezwykle ciekawe eksperymentalnie wyniki, które wskazują na olbrzymi potencjał przestrzennego sterowania mikroukładami umieszczonymi w cieczy za pomocą światła, choć jeszcze bez wskazania konkretnych zastosowań. Przedstawiony przez autorkę opis eksperymentów wykonanych z użyciem mikrosztang przy różnych warunkach sterowania zyskałby dodatkowo na wartości jeśli do rozprawy dołączone byłyby pliki z zapisem video eksperymentów. Doktorantka wprowadziła też model matematyczny opisujący ruch mikrosztangi dla wszystkich rozważanych metod sterowania (metody I-IV). Zaproponowany model pomimo zastosowanych, szczegółowo omówionych w rozprawie, przybliżeń, pozwala na bardzo dokładny opis ruchu mikrosztangi dla wszystkich rozważanych przypadków. Opracowany model ma wartość metrologiczną, gdyż w połączeniu z eksperymentem pozwala m.in. na



wyznaczenie siły i momentu siły wiru optycznego wygenerowanego przez zastosowane układy pułapkujące.

W rozdziale 4.2 mgr inż. Weronika Lamperska przedstawiła swoje własne oryginalne opracowanie układu oscylującej kulki uwieszonej w układzie rozłożonych przestrzennie 2 pułapek optycznych: jednej słabej pułapki stałej oraz drugiej silnej migającej. Opracowany przez autorkę model układu w połączeniu z eksperymentem pozwala na bardzo dokładne wyznaczanie lokalnie lepkości cieczy oraz sztywności pułapki słabej. Powyższe obserwacje pozwoliły doktorantce na zaproponowanie nowej koncepcji wiskozymetru pozwalającego na pomiar dynamiczny i lokalny pomiar bardzo niskich lepkości. Powyższe zagadnienie jest niezwykle istotne przy badaniach procesów dyfuzji w niejednorodnych mieszaninach cieczy, gdzie nie istnieją dobre metody badawcze pozwalające na punktowe pomiary dynamicznych zmian lepkości roztworów. Ponadto, jak zaznaczono w rozprawie, zaproponowana metoda, może zostać także zastosowana do wyznaczania modułów wiskoelastycznych preparatów organicznych. Należy jednak zwrócić uwagę że stosowanie metody wymaga kalibracji układu w cieczy o znanej lepkości co może utrudnić jej wdrożenie.

Kolejnym układem badanym przez mgr Lamperską była mikrokulka wykonana ze szkła sodowego pokryta nanowarstwą srebra umieszczona wewnątrz pułapki optycznej ciemnej, czyli wiru optycznego wysokiego rzędu (Rozdział 4.3). Dzięki odpowiednio dobranym wymiarom kulki i wiru zaobserwowano proces przenoszenia pędu z wiązki optycznej do kulki, co powodowało wirowanie kulki w pułapce. W pracy wykazano, że prędkość kątowna ruchu wirowego zależy silnie od lepkości cieczy w otoczeniu kulki. To pozwoliło na przeprowadzenie lokalnych pomiarów dynamiki dyfuzji cieczy związanej z niejednorodnymi zmianami lepkości wywołanej wprowadzaniem zaburzenia w postaci pojedynczych kryształków sacharozy o masie ok. 1 mg. Doktorantka wykazała jednocześnie złożony charakter procesu dyfuzji wymagający uwzględnienia w pomiarach tak subtelnych zjawisk jak parowanie powierzchniowe cieczy.

W Rozdziale 4.4. Doktorantka przedstawiła wynik zastosowania układu pary pułapek optycznych do pomiaru sztywności DNA oraz komórek i jader komórek blastycznych szpiku



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

kostnego. Do pomiaru została zastosowana znana metoda przyłączania kulek sfunkcjonalizowanych streptawidyną do badanego obiektu biologicznego oraz jego rozciągania poprzez przyłożenie dwóch jasnych pułapek optycznych do kulek. Zaprezentowane wyniki eksperymentalne pozwoliły wyznaczyć sztywność nici DNA z różnymi stosunkami par zasad AT i GC. Powyższa metoda posiada potencjał do wykorzystania w badaniu uszkodzeń DNA związanych ze stosowaniem leków oraz efektami starzeniowymi. W tym samym rozdziale Doktorantka przedstawiła także bardzo interesujące wyniki związane z zastosowaniem wirów optycznych do badania właściwości ferrofluidów. Przy zastosowaniu pułapki ciemnej w obecności zewnętrznego pola magnetycznego po raz pierwszy wygenerowano w badanym ferrofluidzie obracającą się wielokątową strukturę której kształt i prędkość obrotu można kontrolować poprzez wartość ładunku wiru optycznego.

Rozdział 5 zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych i krótką weryfikację tez rozważanych w rozprawie. Mgr. Weronika Lamperska podkreśliła w tej części pracy swój udział w rozbudowie układów peset optycznych na kilku poziomach, od budowy nowej aparatury składającej się z peset dwulaserowych holograficznych i półholograficznych, poprzez opracowanie i wytworzenie nowych mikronarzędzi sterowanych wiązkami laserowymi aż do opracowania metodyki użycia wybranych narzędzi i przeprowadzania pomiarów oraz praktycznego ich zastosowania w metrologii.

Przedstawioną przez mgr inż. Weronikę Lamperską rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Praca zawiera nowe wartościowe wyniki dotyczące zastosowania złożonych układów szczypiec optycznych umożliwiających sterowanie za pomocą światła oryginalnie opracowanymi przez autorkę mikronarzędziami. Rozważane układy mają duży potencjał praktyczny do zastosowania jako narzędzia pomiarowe i manipulatory sterowane światłem w mikrofluidyce. Praca stanowi ważny element aktualnych badań światowych dotyczących budowy bardzo czułych układów pomiarowych do badań w mikrofluidyce. Rozważane układy są znacznie rozbudowane i wykraczają poza zakres obecnej wiedzy w dziedzinie pułapkowania optycznego w cieczach.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

Praca jest napisana bardzo starannie. Nie zawiera ona istotnych błędów merytorycznych ani formalnych. Wszystkie analizy są poparte odniesieniami do właściwej literatury. Otrzymane wyniki są dogłębnie analizowane i ilustrowane wykresami, które pozwalają na łatwe zrozumienie przedstawionej analizy i wniosków. Świadczy to o bardzo głębokiej wiedzy i zrozumieniu badanych zagadnień przez Doktorantkę.

Zakres przeprowadzonych badań i zbudowanych i testowanych mikronarzędzi jest imponujący i przekracza liczbę zazwyczaj rozważanych wątków w pracach doktorskich. Niezwykle cenne jest, że mgr Lamperska przedstawiła wyniki związane z zastosowaniem mikronarzędzi, które nie tylko zakończyły się sukcesem, ale także inne zbudowane układy, których działanie było niegodne z przewidywaniami Doktorantki. Takie podejście pozwala to dodatkowo prześledzić proces dochodzenia Doktorantki do najlepszych rozwiązań, oraz lepiej zrozumieć ograniczenia w budowie i zastosowaniu mikronarzędzi. Rozdział 4.1.4 zatytułowany *Niekompletne mikronarzędzia* uważam za jeden z najważniejszych w przedstawionej pracy.

Jak każda rozprawa doktorska również praca Pani mgr Weroniki Lamperskiej zawiera pewne słabsze fragmenty i pewne niejasności w subiektywnej opinii recenzenta, które przedstawiam poniżej.

W rozdziale 1 doktorantka przedstawiła wyłącznie cel i tezy rozprawy. Zabrało mi w tym miejscu opisu motywacji podjęcia tematu, wyjaśnienia jaki problem praca rozwiązuje i dlaczego pojęty temat jest istotny dla rozwoju dziedziny. Powyższe informacje oczywiście znajdują się w pracy umieszczone w kontekście omawiania poszczególnych wyników przedstawianych przez doktorantkę oraz są przedyskutowane w Rozdziale 5 rozprawy przedstawiającym podsumowanie pracy. Uważam jednak, że rozprawa zyskałaby na przejrzystości przy przedstawieniu jej motywacji na początku pracy.

Przy wyprowadzeniu równań opisujących pułapkowanie w reżimie Rayleigha na str. 19 niejasny jest opis zmiennych w równaniu (2.3), w szczególności brakuje wyjaśnienia dlaczego przyjęto tę samą wartość wektora indukcji pola magnetycznego B działający na dipol w



niejednorodnym polu elektromagnetycznym. Dodanie referencji do literatury na której opierała się Autorka w przytoczonym wyprowadzeniu byłoby również wskazane.

W przedstawianych zdjęciach mikroskopowych mikronarzędzi w Rozdziale 4 Autorka nie umieściła skali, co utrudnia zrozumienie przedstawionych prac eksperymentalnych. Należy jednak dodać doktorantka sumiennie przy każdym opisie mikronarzędzi podaje pełny opis ich wymiarów w tekście rozprawy, ale dodanie skali na przedstawionych zdjęciach mikroskopowych ułatwiłoby odbiór rozprawy. Drugim mankamentem przewijającym się przez cały opis części praktycznej (Rozdział 4) jest brak informacji o bezwzględnych wartościach natężenia wiązki, którymi posługuje się doktorantka przy pułapkowaniu w rozważanych układach szczypiec optycznych. W szczególności powyższa uwaga odnosi się do rozdziału 4.2 gdzie autorka wprowadza rozróżnienie na pułapkę słabą i silną. W rozdziale 4.1.3. (str. 76), doktorantka stwierdza, że w przypadku zastosowanego wiru optycznego do sterowania mikrosztangą oszacowana moc optyczna wiązki wynosi 140 mW, ale brak informacji w jaki sposób została ta wartość oszacowana i jakiej gęstości mocy odpowiada.

W równaniu (4.7) na str. 79 doktorantka definiuje współczynniki do uproszczonego równania oscylatora w przypadku przepływu laminarnego. Jednak nie jest wyjaśnione skąd one pochodzą – czy zostały przyjęte na podstawie literatury, czy oryginalnie zaproponowane przez doktorantkę, a w tym przypadku w jaki sposób Doktorantka doszła do zaproponowanej postaci współczynników.

W częściach rozprawy dotyczących zastosowania zbudowanych układów do pomiaru lepkości plazmy nasienia oraz zastosowań metrologicznych proponowanego układu rozważanego mikrowizkozymetru (Rozdział 4.2.1 i 4.2.2.) brakuje analizy wpływu temperatury na otrzymane wyniki lepkości oraz sztywności. Przy praktycznych zastosowaniach metrologicznych informacja o wpływie temperatury na dokładność wyników oraz ewentualna konieczność zapewnienia stabilności temperaturowej układu pomiarowego w zadanym przedziale jest niezwykle istotna.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

Powyższe uwagi dotyczą słabszych aspektów przedstawionej pracy, ale nie podważają w żaden sposób mojej bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej jako całości oraz ważnych i oryginalnych osiągnięć badawczych Doktorantki.

Uzyskane wyniki stanowią oryginalny i istotny krok w rozwoju układów pęset optycznych oraz mikronarzędzi sterowanych optycznie i mogą się znacząco przyczynić do ich wdrożenia do metrologii biochemicznej. Ze względu na zastosowanie mikronarzędzi opracowane metody pozwalają na bezinwazyjne pułapkowanie i sterowanie pojedynczymi komórkami w układach in-vitro, gdyż wyeliminowano bezpośrednie niekorzystne oddziaływanie wiązki laserowej na komórki. Prace zostały docenione przez środowisko naukowe, o czym świadczy 6 publikacji w uznanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym z IF oraz ich cytowania obce pomimo krótkiego czasu jaki upłynął od publikacji.

Mając na uwadze bardzo aktualną tematykę pracy, jej olbrzymi potencjał praktyczny oraz wysoki poziom naukowy rozprawy wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej magister Weroniki Lamperskiej. W szczególności na wyróżnienie zasługują oryginalne prace badawcze nad budową mikrowiskozymetru w układzie dwulaserowej pęsety optycznej wykorzystującej stałą oraz migającą pułapkę do wymuszenia oscylacji mikrokulki polistyrenowej. Zaproponowane podejście jest oryginalne i pozwala na lokalne i dynamiczne wyznaczanie niewielkich zmian lepkości cieczy i zawiesin. Wyniki powyższych prac badawczych stanowią istotny wkład w rozwój nowych technik metrologicznych o dużym potencjale wdrożeniowym. Autorka przedstawiła pierwsze wyniki dotyczące jej zastosowania do dokładnych ilościowych pomiarów lepkości plazmy nasienia, która stanowi jeden z istotnych czynników diagnozowania przyczyn bezpłodności. Badania zostały opublikowane w jednym z najlepszych czasopism naukowych w dziedzinie metrologii na świecie: *Optics and Laser in Engineering* (IF= 4.273).

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska oraz dotychczasowy dorobek mgr inż. Weroniki Lamperskiej spełniają wymogi stawiane przez ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, jak



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

również zgodnie z Ustawą z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw, w części dotyczącej stopnia doktora i może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Warszawa, 19.06.2021



Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński