



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki



www.fizyka.pw.edu.pl

ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa; tel. +48 222 347 267; fax. +48 226 282 171

Warszawa, 31 sierpnia 2016

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Baci
pt.: "Zastosowania holograficznej pęsety optycznej do pomiarów
wybranych właściwości preparatów biologicznych i koloidów"

Od czasu odkrycia przez Ashkina w 1997 roku pułapkowania optycznego mikro-objektów przy użyciu wiązek laserowych metoda ta jest stale udoskonalana a zakres jej stosowalności rośnie. W szczególności udało się do manipulowania położeniem i kształtem pułapek optycznych zaprząć metody holografii komputerowej, realizowanej na ciekłokrystalicznych fazowych modulatorach światła. Dzięki temu pojawiły się możliwości swobodnego kształtowania liczby, mocy, przestrzennych dystrybucji mocy a nawet momentów pędu pułapek optycznych. Są to istotne zalety w przypadku pomiarów preparatów biologicznych, gdzie należy szybko dostosowywać wyświetlane pułapki optyczne do położenia i natury interesujących obiektów.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Baci doskonale wpisuje się w ten trend. Wykonana została pod kierunkiem profesorów Politechniki Wrocławskiej: dr. hab. Jana Masajady i dr. hab. Marty Kopaczyńskiej w Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Praca, licząca 117 stron, poświęcona jest badaniom nad wykorzystaniem holograficznej pęsety optycznej do pomiarów ilościowych i jakościowych preparatów chemicznych i biologicznych. Tym samym mieści się ona doskonale w specjalizacji grupy badawczej Laboratorium Manipulatorów Optycznych.

Selekcja materiału została przeprowadzona poprawnie a układ i objętość pracy są w pełni adekwatne do przedstawionych tez. Pracę czyta się przyjemnie i można odnieść pozytywne wrażenie, że jest to forma chronologicznego przedstawienia procesu pokonywania kolejnych problemów w procesie badawczym, co ukoronowane zostało opracowaniem skutecznej metodyki pomiarów stałych elastycznych łańcuchów DNA oraz najważniejszym odkryciem - obserwacją indukowanych optycznie wirów wielokątnych w roztworach.

Rozprawa rozpoczyna się od wprowadzenia opisującego ideę oraz realizację holograficznej pęsety optycznej (rozdziały 1, 2). Dopiero po zaznajomieniu się z zasadą działania urządzenia oraz jego ograniczeniami czytelnik jest zapoznawany z tezami rozprawy doktorskiej. Jest to skuteczny zabieg edytorski poprawiający spójność dzieła. Same tezy dotyczą stosowalności holograficznej pęsety optycznej do prowadzenia ilościowych pomiarów sił mechanicznych w preparatach biologicznych i właściwości fizycznych koloidów. Zdaniem Recenzenta teza nr 2 została sformułowana



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki



www.fizyka.pw.edu.pl

ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa; tel. +48 222 347 267; fax. +48 226 282 171

z użyciem zbyt ogólnego sformułowania "unikalne badania". Można było się w niej odnieść do konkretnych efektów uzyskanych w koloidach oświetlonych skupioną wiązką laserową zmodyfikowaną przez układ pęsety optycznej. Wyniki własne autora rozpoczynają się na rozdziale czwartym i zajmują 88 stron. W pierwszej kolejności zaprezentowano proces i rezultaty optymalizacji pęsety optycznej pod kątem jakości wiązek ugiętych w pierwszym rzędzie dyfrakcji za pomocą przestrzennego modulatora światła SLM. Interesujący jest pomysł wykorzystania ferrofluidu jako warstwy pozwalającej na wizualizację kształtu a w szczególności symetrii pułapek optycznych. W rozumieniu Recenzenta umożliwiło to odkrycie nowych efektów (wirów, tworzenia pęcherzyków gazu) w tych ośrodkach w obecności wiązki laserowej o dużym natężeniu. Odkrycie tych efektów stanowi istotny element nowości wymagany w rozprawach doktorskich. Rozdziały 5 i 6 opisują wyniki użycia zoptymalizowanej pęsety optycznej do pomiarów stałych elastycznych łańcuchów DNA oraz wywoływania efektów w warstwie ferrofluidu. Część pracy opisująca procedury przygotowywania preparatów zasługuje na pochwałę, gdyż szczegółowość opisów pozwoli w przyszłości na powtórzenie lub/i kontynuację badań. Pomimo dyskusyjnych jakości dopasowań nachylenia krzywych determinujących stałe elastyczności do punktów pomiarowych udało się uzyskać ilościowe wyniki idące w parze z celowymi modyfikacjami łańcuchów DNA doksyrybicyną. Uznają to za duży sukces i początek na drodze do opracowania metodyki powtarzalnych pomiarów diagnostycznych w praktyce medycznej. W rozdziale 6 zawarto bardzo pomysłowy eksperyment dowodzący tezy, że w wyniku oświetlenia ferrofluidu wiązką o dużej mocy tworzy się pęcherzyk gazu o wypukłej granicy między fazami, manifestującej się ciemnym pierścieniem w obrazie na kamerze. Rozdziały 7 i 8 podsumowują całość uzyskanych wyników. Pracę zamyka lista 96 pozycji literaturowych świadczących o dobrym rozeznaniu autora w stanie wiedzy z zakresu pułapkowania optycznego, ferrofluidów oraz pomiarów łańcuchów DNA.

Na pochwałę zasługuje efektywna współpraca Doktoranta z innymi grupami badawczymi z Politechniki Wrocławskiej oraz Uniwersytetu Zielonogórskiego, co zaowocowało przebadaniem szerokiego spektrum preparatów biologicznych oraz koloidów. Dzięki temu trudno dostrzec jakiegokolwiek braki w przeprowadzonych eksperymentach opisanych w najważniejszych rozdziałach 5 i 6. Dobra współpraca z obcymi zespołami badawczymi oraz fakt, że opublikowane wyniki zostały przyjęte z entuzjazmem w środowisku dobrze wróży co do przyszłej kariery Doktoranta w świecie nauki.

Należy w tym miejscu nadmienić, że holografia komputerowa mimo wielu lat badań nie doczekała się jeszcze masowych zastosowań praktycznych, a omawiana rozprawa otwiera możliwości prowadzenia w przyszłości regularnych i ilościowych pomiarów w praktyce diagnostycznej. Tym samym Rozprawa skupiająca się głównie na aspektach pomiarowych, stanowi również istotny krok naprzód w dziedzinie holografii syntetycznej.

Głównym i właściwie jedynym zarzutem merytorycznym jest zbyt zdawkowy opis samej zasady działania modulatora SLM w zastosowaniu do holograficznej pęsety optycznej, a w szczególności niedoskonałości tegoż modulatora. W praktyce największym ograniczeniem rozwoju



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki



www.fizyka.pw.edu.pl

ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa; tel. +48 222 347 267; fax. +48 226 282 171

układów HOT są właśnie wady przestrzennych modulatorów światła opartych na ciekłych kryształach, m.in. użyty w doświadczeniach modulator Holoeye PLUTO. Jednym z istotniejszych problemów są drgania orientacji direktora ciekłych kryształów w wyniku binarnego sekwencyjnego sterowania napięciami przykładanymi do elektrod konkretnych pikseli modulatora na zasadzie PWM (Pulse Width Modulation). Powodują one zwykle oscylacje wydajności dyfrakcyjnej modulatora z częstotliwościami rzędu 100-120Hz (ang. flicker), które w przypadku pułpki optycznej powinny manifestować się periodycznymi zmianami natężenia światła w pułapce i przez to harmonicznymi zmianami siły ogniskującej danej pułapki. Być może wspomniane w pracy szybkie przemieszczenia pęcherzyków gazu w ferrofluidzie mają pośredni związek z efektem flicker. Nie znalazłem w pracy wzmianki o tym efekcie ani analizy wpływu tych drgań na wyniki uzyskiwane przy badaniach łańcuchów DNA i ferrofluidów, szczególnie że wykorzystywana w układzie ultra-szybka kamera pozwoliłaby na doskonałe scharakteryzowanie tego efektu. Pomocne może tu być posłużenie się zerowym rzędem ugięcia jako pułapką referencyjną, która przy wyłączonym SLM nie powinna wykazywać efektu flicker. Nawet jeżeli efekt flicker nie był widoczny w eksperymentach na pierwszy rzut oka, to pomiary dynamiki pułapek w dziedzinie czasu w funkcji ich położenia powinny zostać przeprowadzone.

Kolejnym negatywnym efektem związanym z fazowymi modulatorami SLM jest zmiana wydajności dyfrakcyjnej siatek dyfrakcyjnych tworzących pułapki poza osią optyczną. Zwykle pułapki optyczne najdalej od osi optycznej wymagają adresowania SLM siatką o okresie około 2 pikseli, które są bardzo mało wydajne. Siatka binarna fazowa posiada wydajność dyfrakcyjną do ok. 40%, podczas gdy kinoformowe siatki o dłuższych okresach wykazują wydajności powyżej 90%. Autor jest świadomy tego efektu - na stronie 29 napisał "Im większe są kąty ugięcia (...) tym wydajność odchylenia wiązki przez modulator jest mniejsza". Nie znalazłem jednak w pracy pomiarów mocy i sztywności pułapki optycznej w funkcji jej położenia (konkretnie odchylenia poza oś optyczną). Taki efekt powinien być zauważalny i należałoby go skompensować. Z drugiej strony autor dokładnie sporządził funkcje korekcyjne pozwalające na precyzyjne pozycjonowanie pułapek optycznych a precyzja pozycjonowania i korygowania symetrii pułapek wykazana w eksperymentach robi duże wrażenie.

Poniżej znajduje się lista pomniejszych uchybień merytorycznych dostrzeżonych w pracy:

1. Strona 2, rys. 2.1.1.1 przedstawia proces ugięcia (refrakcji) światła na sferycznym przezroczystym obiekcie. Jest to lepsze określenie, niż użyte w tekście ogólniejsze pojęcie rozpraszania światła.
2. Strona 5: sformułowanie "Modulator SLM (...) jest w stanie dowolnie odchylić wiązkę od osi optycznej" jest nadużyciem. Maksymalny kąt takiego odchylenia jest mocno ograniczony do kilku stopni i właściwie jest to główne ograniczenie stosowalności układów typu HOT.
3. Strona 11: referencja numer 45 dotycząca technologii nVidia CUDA prowadzi do strony WWW producenta. Istnieje wiele cennych artykułów opisujących użycie tej technologii w holografii komputerowej, których zacytowanie byłoby bardziej na miejscu.



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki



www.fizyka.pw.edu.pl

ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa; tel. +48 222 347 267; fax. +48 226 282 171

4. Rys. 4.11 pokazuje efekt działania wyjustowanego układu, ale autor nie napisał czarno na białym jaka była procedura justowania. Czy polegała ona jedynie na nałożeniu na hologramy mapy korygującej przedstawionej na rys. 4.17?
5. Rys. 4.18: interferogram modulatora po korekcji jest mocno zaburzony. Być może powodem jest fakt, że z wiązką odniesienia w interferometrze interferują dwie wiązki obite od SLM - pierwszy rząd ugięcia ze skorygowaną geometrią oraz zerowy rząd ugięcia, w którym korekcji nie da się przeprowadzić. Zwykle powinno się interferować SLM z nałożoną siatką dyfrakcyjną tak, żeby odseparować kątowo zerowy rząd ugięcia. Z drugiej strony mapa korekcyjna wypracowana w toku badań pozwoliła na uzyskanie wysoko symetrycznych pułapek, zatem może być uznana za wystarczająco dobrą.
6. Rys. 4.1.10 przedstawia symbolicznie kamerę CCD z obiektywem, podczas gdy z geometrii układu powinno raczej wynikać, że rolę obiektywu spełnia soczewka umieszczona tuż za kostką światło-dzielącą, a sama kamera powinna być pozbawiona obiektywu.
7. Rys. 5.1.2.4: autor powinien podać algorytm, którym posłużył się przy dopasowywaniu odcinków wykresów na podstawie chmur punktów pomiarowych, tym bardziej że na rys. 5.1.2.7 dopasowanie ostatnich odcinków krzywych łamanych (dla największych wartości siły i długości nici) na podstawie tak małej liczby punktów pomiarowych jest bardzo wątpliwe. Ponadto autor nie napisał wyraźnie z czego wynika tak wielka liczba punktów pomiarowych na każdym wykresie i skąd tak wielki rozrzut punktów pomiarowych wokół dopasowanych krzywych łamanych. Po drugie na tych wykresach parametrem kontrolowanym przez użytkownika była siła wywierana przez pułapki a efektem zmiana długości nici, a zatem osie wykresów powinny być zamienione, co zwiększyłoby czytelność wykresów.
8. Strona 59: "(,..) można zatem przypuszczać, że pomiędzy kulkami znajdują się rozpięte równoległe dwie nici DNA." - autor powinien podjąć próbę potwierdzenia tej tezy inną metodą eksperymentalną bądź jawnie napisać, że takie potwierdzenie nie było możliwe z przyczyn technicznych.
9. Strona 72: Stwierdzenie "próbki ferrofluidów posiadają duże tłumienie światła (są nieprzeźroczyste przy większych grubościach)" jest kolokwializmem, ale może też świadczyć o niezrozumieniu przez autora pojęcia współczynnika absorpcji światła. Jeżeli warstwy ferrofluidu można uznać za jednorodne, to posiadają one niezerowy i stały współczynnik absorpcji niezależny od grubości warstwy, a nie dopiero "przy większych grubościach".
10. Rys. 6.1.2.3.7 b) - czy asymetryczny kształt pęcherzyka wynikał ze słabej jakości pułapki, czy raczej był rezultatem efektów dynamiki pęcherzyka w czasie?
11. Generalnie w pracy zamieszczono wiele sekwencji pokazujących ruch mikro-objektów w polu widzenia kamery. W recenzji pracy i w samym zrozumieniu obserwowanych zjawisk bardzo pomogłoby załączenie animacji np. na płycie CD-ROM lub stronie www.

Pozytywny odbiór psują liczne błędy interpunkcyjne (np. s. 34 "widoczne na tym obrazie kręgi, nie są prążkami") i językowe (np. "wyrażając tą wiarę", "element peltier", "Peltiera" pisane



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki



www.fizyka.pw.edu.pl

ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa; tel. +48 222 347 267; fax. +48 226 282 171

kursywą itp.). Powinny też zostać wyeliminowane błędy edytorskie, przykładowo w spisie treści nie istnieje rozdział szósty. Kuriozalny jest sposób numerowania ilustracji jako rozwinięcia długich kodów podrozdziałów, np. rys. 6.1.2.4.13. Jak rozumiem, było to numerowanie automatyczne w edytorze tekstu, co jednak nie pomogło ustrzec się błędów w oznaczeniach - np. na stronie 87 są dwa rysunki o kodzie 6.1.2.3.5, a podpis pod rysunkiem 4.1.12 odnosi się do nieistniejącego rysunku 2.3.1.10. Również numerowanie referencji literaturowych m.in. na stronie 5 powinno zostać skrócone. Z drugiej strony jakość ilustracji autorskich w Rozprawie jest bardzo wysoka a źródła nielicznych ilustracji zapożyczonych są odpowiednio wymienione, co jest obecnie rzadkością. Rys. 6.1.2.4.10 słabo uwidacznia zaobserwowane na Saturnie zjawisko atmosferyczne - należało poddać edycji kontrast tej ilustracji. Powyższe zarzuty edytorskie są jednak małego kalibru i nie zmieniają pozytywnej opinii Recenzenta o Rozprawie.

Zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym zadaniem recenzenta jest stwierdzenie, czy praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, czy wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w zakresie fizyki oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Po zapoznaniu się z Rozprawą mgr. inż. Marcina Baci nie mam żadnych wątpliwości, że wszystkie wymogi Ustawy są spełnione, a sama praca napisana jest rzetelnie i świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu teoretycznym i praktycznym Doktoranta.

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Baci oraz o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. inż. Michał Makowski
Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska