



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, 23 lipca 2020

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Szatkowskiego
pt.: "Fine structures of light generation with spatial light modulators"

W ciągu kilku ostatnich dekad ciekłokrystaliczne przestrzenne modulatory światła (ang. Spatial Light Modulator, SLM) przeszły spektakularną ewolucję. Zysały możliwość modulacji praktycznie czysto fazowej, wzrosła liczba ich pikseli, a wreszcie wprowadzenie technologii LCoS (Liquid Crystal on Silicon) umożliwiło znaczne skrócenie czasów przełączania. Aktualnie topowe urządzenia tego typu oferują znakomite możliwości dyfrakcyjnego kształtowania koherentnych frontów falowch dzięki gęsto upakowanej strukturze pikseli o rozmiarach rzędu $3\mu\text{m}$ i ponad 90% stopniu wypełnienia. Dzięki temu stały się „koniem pociągowym” współczesnej holografii komputerowej, której zadaniem jest wyliczenie i wyświetlenie na SLM rozkładu fazowego, który przekształci wiązkę światła padającą na panel tak, by wytworzyć w dalekim polu z góry założony rozkład przestrzenny z maksymalną wiernością. Dodatkową zaletą takiej metody wytwarzania pól optycznych jest kontrola nad fazą, co pozwoliło na uzyskanie w wielu grupach badawczych w świecie wiązek światła o wewnętrznej, często egzotycznej strukturze.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Szatkowskiego doskonale wpisuje się w ten trend. Wykonana została pod kierunkiem profesora Politechniki Wrocławskiej, p. dr. hab. Jana Masajady w Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Licząca 124 strony praca poświęcona jest badaniom nad wykorzystaniem ciekłokrystalicznych przestrzennych modulatorów światła do wytwarzania wysokiej jakości strukturyzowanych wiązek światła. Praca miała na celu udowodnienie jawnie sformułowanej tezy w brzmieniu: „Spatial Light Modulators are capable of creating a wide range of high quality non-conventional optical fields”, czyli w wolnym tłumaczeniu recenzenta „Przestrzenne modulatory światła są w stanie wytworzyć wiele niekonwencjonalnych pól optycznych wysokiej jakości”. W mojej opinii tak sformułowana teza jest bardzo ogólnikowa i przez to bardzo prosta do udowodnienia, gdyż wiele rodzajów pól świetlnych można zaklasyfikować jako „niekonwencjonalne” – np. można tak nazwać każdą wiązkę bezdyfrakcyjną, lub samo-obrazującą. Stoję na stanowisku, że rozprawa doktorska powinna udowodniać jednak konkretną hipotezę dotyczącą znacznie wężej zdefiniowanego zjawiska lub obszaru badań, np. wirów optycznych lub nieco ogólniej pól z osobliwościami/nieciągłościami fazowymi.

W podobnym tonie niestety należy skomentować również sam tytuł rozprawy, który przy takim szyku zdania w tłumaczeniu na język polski brzmi „ładne struktury generacji światła z przestrzennymi



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

modulatorami światła”. Pomijając nieeleganckie powtórzenie słowa „light”, takie sformułowanie tytułu jest mylące i nie koresponduje z jego angielskojęzyczną wersją. Myślę, że sformułowanie tytułu np. w postaci „Generation of high-quality, fine-structured light with spatial light modulators” byłoby znacznie trafniejsze.

Abstrahując jednak od tytułu i tezy, tematyka całej rozprawy jest bardzo spójna i dotyczy kalibracji i korekcji modulatora SLM, a następnie wykorzystaniu go do wytwarzania pól dyfrakcyjnych zawierających osobliwości fazy. W mojej opinii selekcja materiału została przeprowadzona dość poprawnie a układ i objętość pracy są w adekwatne do przedstawionych tez. Nieco nadmiarowy wydaje się np. rozdział 4.4 dotyczący kolejnego zastosowania proponowanych pól. Chyba lepiej byłoby skupić się na mniejszej liczbie tematów z gruntowniejszym ich omówieniem, co może też umożliwić zawężenie tezy rozprawy.

Mam też ogólną wątpliwość dotyczącą indywidualnego wkładu merytorycznego p. Szatkowskiego w zaprezentowane wyniki. Ogrom pracy teoretycznej, programistycznej i eksperymentalnej sprawia, że zaangażowany musiał być tutaj spory zespół, co oczywiście widać też po liście współautorów publikacji. Niestety nie znalazłem w rozprawie omówienia powyższej kwestii, a jednak praca tego typu powinna zawierać element nowości wytworzony osobiście przez osobę pretendującą do stopnia naukowego doktora, szczególnie w obszarze fizyki.

Ogólnie biorąc, wyniki zgromadzone w rozprawie mają dużą wartość i stoją na wysokim poziomie. Przykładowo, zgodność uzyskana pomiędzy wynikami symulacji i doświadczenia w podrozdziale 4.3.2 robią duże wrażenie i musiały wiązać się ze żmudnym kalibrowaniem zarówno SLM jak i innych elementów w układzie optycznym. Na wyróżnienie zasługuje fakt, że praktycznie wszystkie pokazane rezultaty były publikowane w latach 2016-2020 w periodykach naukowych, w tym jeden w *Optics Express*. Pan Mateusz Szatkowski w dwóch artykułach wymieniony jest jako pierwszy autor. Wyniki były też prezentowane w postaci pięciu doniesień konferencyjnych. Być może to, lub szeroka współpraca w gronie międzynarodowym, było powodem, słusznej moim zdaniem, decyzji o spisaniu pracy doktorskiej w języku angielskim.

Pracę czyta się przyjemnie i mimo że jej angielszczyzna nie jest doskonała, przekaz informacji jest bez zarzutu. Rozprawa powstała na solidnym fundamencie przeprowadzonego uprzednio dogłębnego studium literaturowego, co znalazło odzwierciedlenie w licznych referencjach do ugruntowanych jak i najnowszych publikacji z omawianej dziedziny.

Rozprawa ma bardzo logiczny układ. Rozpoczyna się od omówienia metodyki strukturyzacji wiązek światła z wykorzystaniem modulatorów SLM. Następnie w drugim rozdziale doktorant omawia sposoby kalibrowania odpowiedzi fazowej SLM oraz kompensacji błędów ich płaskości. W naturalnej konsekwencji w kolejnych rozdziałach pokazane są zastosowania proponowanej metodyki do wytwarzania pól świetlnych zawierających wiry optyczne. Nieco dziwi wyróżnienie części dotyczącej charakteryzacji wiązek laserowych jako osobnego rozdziału, podczas gdy w opinii



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

recenzenta jest to jedno z zastosowań, które powinno się raczej zaliczyć do rozdziału 4 („Applications”). Praca zawiera rozdział z podsumowaniem, z którym autor zawarł sugestie co do kierunków dalszych badań. Na pochwałę zasługuje też zawarcie obszernego dodatku, będącego swoistą instrukcją obsługi oprogramowania, które Doktorant stworzył do obliczania rozkładów fazowych wyświetlanych na SLM.

Pewnym zarzutem merytorycznym dotyczącym całości rozprawy jest pominięcie w kilku sytuacjach numerycznych symulacji pól dyfrakcyjnych generowanych przez pracowicie wyliczone hologramy komputerowe. Najczęstszym postępowaniem w procesie poznawczym w holografii syntetycznej jest: teoria, symulacja numeryczna, eksperyment optyczny, a w końcu analiza zbieżności wyżej wymienionych etapów. W mojej opinii pominięcie części symulacyjnej sprawia, że nie ma możliwości krytycznego spojrzenia na wyniki eksperymentu pod kątem zgodności z przewidywaniami. Przykładowo, obecność szumu czy wtrąceń w wynikach eksperymentu można mylnie identyfikować jako nową informację, podczas gdy brak powyższych elementów w symulacji praktycznie dowodzi, że również w eksperymencie powinno ich nie być i stanowią pewien błąd. Oczywiście w recenzowanej rozprawie symulacje numeryczne pojawiają się w wielu miejscach, ale nacisk na nie jest niewielki i przez to automatycznie prawie nie spotyka się krytycznego porównania zgodności eksperymentu z numeryką. Tym bardziej, że takie porównania dałyby dwie dodatkowe korzyści: po pierwsze potwierdziłyby poprawność kalibracji i wyptaszczenia SLM, a po drugie umożliwiłyby ogląd fazy w dalekim polu, co w eksperymencie nie jest bezpośrednio możliwe, a jednak ma duże znaczenie z punktu widzenia np. transferu orbitalnego momentu pędu. Przykładowo, na Fig. 3.16 nie wiadomo do końca czy przedstawiono wyniki numeryczne czy eksperymentalne, ale niezależnie od stanu faktycznego bardzo dużo wniosłoby właśnie ich zestawienie ze sobą i porównanie. Fig. 4.2 zawiera wyniki, które również aż proszą się o skonfrontowanie z polem przesymulowanym numerycznie. Podobnie w Fig. 4.21 stosunkowo łatwo byłoby porównać wyniki z symulacjami, przy okazji poznając rozkłady fazy bez konieczności dodawania na siłę wiązki odniesienia.

Niefortunne jest brzmienie tytułu rozdziału 2 („LCoS calibration and correction”), gdzie autor powinien zajmować się korekcją modulatora LCoS rozumianą jako wprowadzanie korygujących funkcji fazowych sprawiających, że staje się on w pierwszym rzędzie ugięcia płaski optycznie. Niestety metody zaprezentowane w tym rozdziale korygują skutecznie, ale nie modulator SLM lecz cały układ optyczny rozumiany jako: źródło światła, SLM, soczewka obrazująca, kamera. Poszczególne przyczynki wymienionych elementów optycznych do całkowitej aberracji optycznej układu nie dadzą się tą metodą rozdzielić. Ponadto nie znalazłem w pracy żadnego nawiązania do izoplanarności i prób jej zmierzenia w przypadku np. korekcji wiązki odbitej od SLM, której symetria była badana jedynie poosiowo (na środku pola). Z dużym prawdopodobieństwem uzyskanie wysokiej jakości symetrii wiązek tworzonych przez SLM pod znacznymi kątami w stosunku do osi optycznej wymagałaby nieco innych masek korekcyjnych. Również pominięta w znacznym stopniu została zależność kształtu podłoża SLM od jego temperatury, przez co większość korekt przedstawionych przez doktoranta straci znacznie na skuteczności przy zmianie warunków środowiskowych pomiaru. Szkoda, że autor



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

nie dostrzegł bardzo adekwatnej publikacji z 2019 roku, dotyczącej precyzyjnej kalibracji korekcji płaskości modulatora SLM w czasie rzeczywistym w funkcji jego temperatury: "Non-invasive correction of thermally-induced wavefront aberrations of Spatial Light Modulator in holographic projection," Opt. Express 27(7), 10193-10207 (2019).

W rozdziale omawiającym modulatory LCoS pominięto dość istotną ich niedoskonałość, a mianowicie przesłuch międzypikselowy (ang. interpixel crosstalk). Jest to efekt manifestujący się najmocniej kiedy w rozkładzie wyświetlonym na SLM znajduje się dużo sąsiadujących pikseli o znacznie różniących się wartościach napięć sterujących, co definitywnie miało miejsce chociażby w rozdziale 4.2, gdzie dwa różne wzory fazowe były łączone maskami- szachownicami o okresie 2 pikseli. Myślę, że wpływ efektu przesłuchu powinien zostać omówiony w pracy nawet jeżeli nie był on dostrzegalny w eksperymencie.

Poniżej znajduje się lista drugorzędnych uchybień merytorycznych dostrzeżonych w pracy:

1. Zdanie „The diffraction grating can redirect almost 100% of light theoretically, while in practice some losses are caused by the discrete values of phase discussed in previous paragraphs” wymaga rozszerzenia o dodatkowe zjawiska zmniejszające wydajność piłokształtnej siatki dyfrakcyjnej, z których dominującym jest upływ energii do wyższych rzędów ugięcia dyfrakcyjnego.
2. Interesujące jest twierdzenie ze str. 20 w brzmieniu „mid-spatial frequencies will not cause a reduction of peak intensity, but rather will cause oscillations of secondary peaks, reducing shadows in the final image” w odniesieniu do wykresu Strehla. Autor powinien podać tu źródło lub inaczej uzasadnić tę tezę.
3. Na wykresie 3.11 dobrze byłoby nanieść słupki błędów oraz podjąć się dopasowania krzywej teoretycznej.
4. We objaśnieniach do wzoru (4.2) nie znalazłem definicji $R()$.
5. W doświadczeniu opisanym w podrozdziale 4.1.2 kamera CCD zapisuje pole odbite od SLM tak, że trafia tam również zerowy rząd ugięcia. Nie jest to jednak widoczne w wyniku zaznaczonym jako „b”. Ponadto w wyniku oznaczonym jako „c” widoczne są duże spadki kontrastu prążków interferencyjnych w okolicach występowania wirów optycznych. Proszę o wyjaśnienie tej obserwacji.
6. Autor uznał za stosowne wyrażać bardzo małe długości rzędu mikrometrów w centymetrach [cm], np. na str. 60 widzimy „0.0017 [cm]”. Ponadto należałoby generalnie pochylić się nad przyjętymi normami dotyczącymi zapisu jednostek. Nawias kwadratowy jest zbędny a oznaczenia jednostki nie pisze się kursywą. Z drugiej strony język angielski pracy może sugerować stosowalność innych zasad pisowni.
7. Fig. 4.7. Proszę o wyjaśnienie dość dużej asymetrii w rozbieżności danych eksperymentalnych względem teorii w rzucie x-y. Jeżeli użyte zostały tak wyczerpująco opisane metody kalibracji i korekcji panelu SLM, takie asymetrie nie powinny mieć miejsca. Być może jest to manifestacja nie-izoplanarności układu optycznego.



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

8. Nie można zgodzić się ze zdaniem ze str. 65, w którym autor twierdzi, że dwie metody podziału pikseli SLM pomiędzy dwa hologramy wyświetlane na nim: losowa i deterministyczna (regularna) dają takie same rezultaty. Metoda podziału losowego w opinii recenzenta daje słabsze powielenia (duplikaty) w dalekim polu, niż metoda regularna, w której maska dzieląca (np. szachownica) stanowi de facto nadmiarową siatkę dyfrakcyjną. Nie jest też prawdą, że tylko w jednej z tych metod można swobodnie zmieniać relacje pól powierzchni SLM zajętych przez dwa hologramy – wydaje się, że w obu metodach można jednak dość prosto to przeprowadzić prostym algorytmem.
9. Czym różnią się przypadki a) i b) w Fig. 4.17, skoro w obu ustalono średnicę oświetlonego fragmentu SLM na 27 pikseli, a jedyną różnicą jest obliczenie w „osobnych symulacjach”. Autor powinien nadmienić, że ponowne przeprowadzenie symulacji wiązało się z (jak się domyślam) ponownym wylosowaniem masek dzielących piksele SLM na dwa podzbiory.
10. Wnioski w podrozdziale 4.2.3 zawierają stwierdzenie, że wyświetlane rozkłady pól nie wykazują zależności od długości fali. Tymczasem jeżeli w grę wchodzi modulator ciekłokrystaliczny typu LCoS, długość fali ma zawsze znaczenie. Nawet jeżeli nie zmienia w sposób widoczny rozkładów natężeniowych, to drastycznie zmienia relacje fazowe w wyświetlanym polu, czego konsekwencją jest np. przelewanie się mocy pomiędzy poszczególnymi rzędami ugięcia dyfrakcyjnego.
11. Czy jest konkretny powód, dla którego w eksperymencie omówionym w podrozdziale 4.3.2 użyto modulatora transmisyjnego zamiast LCoS, jak w reszcie pracy?

Lista pomniejszych błędów edycyjnych lub językowych dostrzeżonych w pracy:

- Ilustracje, nawet autorskie, ale zapożyczone z uprzednio opublikowanych artykułów powinny być odpowiednio zacytowane. W wielu przypadkach w rozprawie (np. Fig. 2.11) nie ma takich adnotacji i przez to nie wiadomo czy ilustracja powstała na indywidualną potrzebę rozprawy, czy też artykułu naukowego.
- Tytuł rozdziału pierwszego zawiera błędne użycie słowa „through” – powinno się użyć raczej „by” albo „with”.
- Ostatnie zdanie pierwszego paragrafu na str. 3 nie posiada czasownika.
- Zdanie na str. 3: „reach internal structure” – chyba powinno być „rich”.
- W rozprawie doktorant używa słowa „overwhelm” w błędnym, moim zdaniem, znaczeniu jako „pokonać, przewalczyć”. Tymczasem słowo to oznacza raczej „przytłaczać”, „zalewać”, „zasypywać”. O nieco lepszym czasownikiem w tym kontekście jest np. „overcome”.
- „Ekspozycja” w kontekście naświetlenia materiału światłoczułego tłumaczy się na j. angielski raczej jako „exposure”, nie „exposition”.

Powyższe zarzuty nie zmieniają skrajnie pozytywnej opinii Recenzenta o Rozprawie.



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

Należy również docenić potencjalne walory aplikacyjne metod zaprezentowanych w pracy. Holografia komputerowa pomimo wielu lat badań nie doczekała się jeszcze masowych zastosowań praktycznych, a omawiana rozprawa otwiera możliwości prowadzenia w przyszłości praktycznych prac w kierunku np. telekomunikacji lub pułapkowania optycznego z możliwością przekazania momentu pędu.

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. Mateusza Szatkowskiego nie mam 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. Mateusza Szatkowskiego oraz dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie ze względu na duży zakres prac doświadczalnych, wysoką jakość uzyskanych wyników, cenny dorobek publikacyjny oraz aktywną, szeroką współpracę międzynarodową wnoszę o wyróżnienie pracy.

dr hab. inż. Michał Makowski
Wydział Fizyki
Politechnika Warszawska

