



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
" Fine structures of light generation with spatial light modulators"
(Generacja egzotycznych stanów pola świetlnego z użyciem
przestrzennych modulatorów światła)
mgr inż. Mateusza Szatkowskiego

Rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom nowych metod generowania i charakteryzacji wiązek świetlnych z wirami optycznymi z użyciem programowalnych przestrzennych modulatorów światła oraz ich użyciem do korekcji tych modulatorów. Praca obejmuje szeroko zakrojony zakres prac związanych z rozwojem algorytmów interaktywnych do metrologii wiązek optycznych oraz ich weryfikacją eksperymentalną. Praca powstała pod kierunkiem dr. hab. Jana Masajady, prof. ucz. na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

W rozprawie Autor bada możliwości zastosowania wiązek z osobliwością optyczną, powszechnie nazywanymi wirami optycznymi, jako obiektywnego narzędzia do oceny skuteczności metod korekcji działania przestrzennych modulatorów światła (tzw. SLM). Przestrzenne modulatory światła są w ostatnich latach coraz powszechniej stosowane do generacji wiązek światła strukturyzowanego. Ze względu na ograniczenia technologiczne istnieje konieczność dodatkowej korekty ich funkcjonowania. W tym celu producenci i



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

użytkownicy opracowali wiele metod poprawy charakterystyk wiązek generowanych przez SLMy. Jednak ocena jakości wprowadzanych korekt była dotychczas dokonywana subiektywnie, gdyż nie istniały narzędzia pozwalające na zestandaryzowane porównanie różnych metod. Praca doktorska pana Mateusza Szatkowskiego podejmuje temat, bardzo istotny dla rozwoju zastosowań przestrzennych modulatorów światła. Wyniki przedstawionych badań mogą mieć istotny wpływ na upowszechnienie zastosowania SLM do generacji wiązek światła strukturyzowanego.

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Szatkowskiego zawiera wyniki opublikowane w latach 2016-2020 w 8 artykułach, z czego 7 prac opublikowano w czasopismach z dziedziny optyki indeksowanych przez Web of Science i posiadających wysokie współczynniki IF. Pan Szatkowski jest pierwszym autorem w dwóch powyższych publikacjach oraz ostatnim autorem w dwóch kolejnych publikacjach, co świadczy o jego kluczowej roli we opublikowanych badaniach. Doktorant jest również współautorem 5 publikacji pokonferencyjnych indeksowanych przez Web of Science bezpośrednio związanych z doktoratem. Prace mgr Szatkowskiego były dotychczas cytowane 49 razy (29 cytowań obcych), co stanowi znaczącą liczbę na obecnym etapie rozwoju zawodowego doktoranta i świadczy o zainteresowaniu środowiska jego pracami. Należy zwrócić uwagę, że metrologia optyczna w zakresie przestrzennych modulatorów światła jest trudnym tematem, który podejmuje niewiele ośrodków na świecie.

Spośród prac w dorobku mgr Szatkowskiego na szczególną uwagę zasługują 2 prace. Pierwsza praca zatytułowana „Optical vortex trajectory as a merit function for spatial light modulator correction,” autorstwa M. Szatkowski, A. Masajada, J. Masajada, która została opublikowana w czasopiśmie *Optics and Laser in Engineering* (IF= 4.273) z 2019 roku, zawiera wyniki badań dotyczących metod weryfikacji jakości wiązek optycznych generowanych w przestrzennych modulatorach światła poprzez śledzenie trajektorii punktu osobliwego wiru optycznego. Druga praca zatytułowana „Generation of composite vortex beams by independent Spatial Light Modulator pixel addressing” autorstwa M. Szatkowski, J. Masajada, I. Augustyniak, K. Nowacka została opublikowana w 2020 roku w czasopiśmie *Optics Communications* i przedstawia eksperymentalne wyniki potwierdzające możliwość



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

generowania dynamicznie modyfikowanych, strukturyzowanych wiązek światła o zaprojektowanych parametrach opartych na superpozycji wirów optycznych i rozłożonego przyporządkowania pikseli do kodowania fazy poszczególnych wirów przy zastosowaniu komercyjnie dostępnych przestrzennych modulatorów światła typu LCoS.

Praca doktorska mgr inż. Mateusza Szatkowskiego obejmuje 114 stron i składa się ze wstępu, 5 rozdziałów, spisu literatury oraz dodatkowego rozdziału stanowiącego przewodnik użytkownika do oprogramowania napisanego przez Doktoranta. We wstępie do rozprawy Autor przedstawił w bardzo syntetyczny sposób motywację, tezę pracy, opis zawartości poszczególnych rozdziałów oraz listę swoich publikacji i wystąpień konferencyjnych, które powstały podczas pracy nad doktoratem.

Rozdział 1 jest poświęcony opisowi teoretycznemu i metodom strukturyzacji wiązki świetlnej. Jego zasadnicza część dotyczy wiązki z wirem optycznym, która jest stosowana w dalszej części rozprawy. Doktorant przedstawił opis matematyczny i analizę generacji wirów optycznych o różnych ładunkach, omówił sposoby generacji wirów przy pomocy spiralnych płytek fazowych, hologramów oraz hologramów generowanych komputerowo. Znaczna część rozdziału została poświęcona przedstawieniu budowy przestrzennych modulatorów światła, zasadom ich działania oraz ich ograniczeniom wynikającym z dyskretyzacji fazy, ograniczonego współczynnika wypełnienia poszczególnych pikseli, migotania fazy pod wpływem zmiennego pola elektrycznego sterującego komórkami ciekłego kryształu oraz zaburzeń płaskości modulatora. Doktorant szczegółowo omówił metody stosowane do optymalizacji działania przestrzennych modulatorów światła związanych z przedstawionymi ograniczeniami. W szczególności doktorant omówił metodę oceny i niwelowania niedokładności związanych z fluktuacjami płaskości powierzchni w ciekłokrystalicznych modulatorach przestrzennych odbiciowych na podłożu krzemowych (tzw. LCoS). W rozdziale przedstawiono bardzo dobrze i szczegółowo metodę korekty przy pomocy wielomianów Zernike.

Rozdział 2 przedstawia analizę i wyniki eksperymentalne zastosowanej przez Autora metody kalibracji przestrzennego modulatora światła na przykładzie modulatora typu LCoS



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

(modulatora ciekłokrystalicznego odbiciowego na podłożu krzemowym). Autor przedstawił wykonaną przez siebie kalibrację fazy modulatora przy pomocy interferencji dwóch wiązek laserowych i analizy ich obrazu prążkowego. Następnie zaprezentował metodę korekty niepłaskiego przestrzennie rozkładu fazy w modulatorze przy zastosowaniu interferometru Michelsona do zapisu dwuwymiarowego interferogramu. Na podstawie interferogramu otrzymano rozkład fazowy do korekty modulatora poprzez zastosowanie odwrotnej transformaty Fouriera. Druga część rozdziału jest poświęcona zawansowanym metodom poprawy jakości modulatora przy zastosowaniu algorytmów iteracyjnych. Bardzo szczegółowo zostało przedstawione działanie algorytmu Gerchberga-Saxtona oraz jego implementacja do kalibracji przestrzennej modulatora LCoS wykonana przez Autora. Jako wzorzec do kalibracji zastosowano wir optyczny. Ten sposób został oryginalnie zaproponowany przez A. Jesacher *et al.* Opt. Express 15, 5801 (2007) – ref. [47]. Autor wykazał, że dzięki właściwościom optycznym wiru i jego czułości na zakłócenia fazowe powyższa metoda pozwala na bardzo dokładną korektę niedoskonałości przestrzennych modulatora. Następnie Autor zmodyfikował przedstawioną metodę. W ostatniej części Rozdziału 2 wykazał, że połączenie metody interferometrycznej Michelsona oraz iteratywnej metody Gerchberga-Saxtona z zastosowaniem wiru optycznego jako wzorca pozwala na dalszą poprawę niedoskonałości przestrzennych modulatora oraz otrzymywanie doskonałej jakości wirów optycznych.

Rozdział 3 przedstawia kluczowe wyniki prac badawczych Doktoranta dotyczące zastosowania wiru optycznego jako obiektywnego wskaźnika do oceny jakości wiązki optycznej. Ze względu na strukturę wiru optycznego i obecność punktu osobliwego w jego centrum, gdzie znajduje się nieciągłość fazy, wir jest bardzo czuły na niewielkie perturbacje fazy. Nawet niewielkie zmiany fazy mogą wywoływać mierzalne przesunięcia punktu osobliwego, co jest stosunkowo łatwe do zmierzenia. Tę właściwość wirów wskazuje Autor jako cechę, która umożliwia zastosowanie wirów do oceny jakości wiązek optycznych generowanych przez przestrzenne modulatory światła. Autor wykazał eksperymentalnie, że w przypadku zastosowania wiązki z wirem optycznym generowanym przez płytkę fazową spiralną oraz oddziałującą ze strukturą wiru o przeciwnym ładunku możliwe jest całkowite zniesienie wiru w przypadku pokrycia się położeń punktów osobliwych. W przypadku



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

odziaływania wiru optycznego z innym rodzajem zaburzenia fazowego obserwowane jest przemieszczenie punktu osobliwego (środka wiru) odzyskiwane z otrzymanego obrazu fazowego. W dalszej części rozdziału Autor analizuje zachowanie wiru w przypadku przesunięcia wiru względem osi optycznej oraz określa położenia punktu osobliwego przy zastosowaniu algorytmów opartych na transformacie typu vortex Larkina m.in. poprzez określenie wartości mimośrodów bez konieczności otrzymywania obrazu fazowego. Śledzenie położenia punktu osobliwego wiru optycznego zostało zastosowane do oceny jakości generowanej wiązki. W ostatniej części rozdziału Autor przeprowadził analizę eksperymentalną wpływu jakości wiązki na zmianę trajektorii położenia środka wiru przy zmianie położenia wiru względem osi optycznej. Zmiana jakości wiązki została wprowadzona przez nałożenie aberracji w postaci zmiany wartości parametru wielomianu Zernike Z^{-2}_2 odpowiadającego astygmatyzmowi wiązki. Doktorant wykazał, że kierunki osi trajektorii przemieszczania się środka wiru zmieniają się dla różnych wielkości wprowadzonego astygmatyzmu. Zmianie ulega także kąt przecięcia osi trajektorii. Metoda ta jest bardzo czuła na nawet niewielkie zmiany astygmatyzmu i może być zastosowana do oceny jakości wiązki w praktycznych układach ze względu na brak konieczności budowy dodatkowych układów interferometrycznych.

Rozdział 4 zawiera wyniki eksperymentalne uzyskane przez Doktoranta dotyczące generacji wiązek światła strukturyzowanego z wykorzystaniem różnego rodzaju przestrzennych modulatorów światła oraz własnego oprogramowania użytkowego przeznaczonego do kalibracji i poprawy jakości generowanych wiązek. Stanowi on podsumowanie prac przedstawionych w poprzednich rozdziałach i weryfikuje uprzednio opracowane algorytmy. Wyniki przedstawione w tym rozdziale zostały opublikowane w 4 pracach w czasopiśmie z IF. W pierwszej części Autor zastosował modulator do generacji wiązki z osiową strukturą wirów optycznych w oparciu o zastosowanie pary pryzmatów fazowych o przeciwnym kierunku zmiany fazy. Zastosowanie programowalnego modulatora pozwoliło na analizę właściwości dynamicznych łańcucha wirów w przestrzeni 3D. Łańcuch wygenerowanych w powyższy sposób wirów charakteryzował się stabilnością oraz zmienną eliptycznością i rotacją eliptyczności wzdłuż osi propagacji wiązki. W kolejnej części



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

rozdziału Doktorant rozważa generację wiązek strukturyzowanych poprzez superpozycję wirów przy wykorzystaniu pojedynczego przestrzennego modulatora światła, w którym poszczególne piksele są odpowiedzialne za kodowanie fazy odpowiadające jednej z wiązek. Takie podejście zapewnia stabilne warunki generacji wiązki strukturyzowanej, gdyż nie wymaga dokładnego justowania wzajemnego wiązek ani zapewnienia stabilności mechanicznej układu optycznego w czasie. Autor w rozdziale prezentuje wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych dotyczących wpływu sposobu przyporządkowywania poszczególnych pikseli modulatora oraz redukcji rozdzielczości na jakość generowanej wiązki strukturyzowanej. Prace eksperymentalne wykorzystujące do kodowania fazy algorytmy wcześniej opracowane przez Autora (Rozdział 2i 3) wykazały, że w zaproponowany sposób możliwe jest otrzymywanie wysokiej jakości stabilnych wiązek światła strukturyzowanego będących superpozycją 2 wirów o różnych ładunkach oraz znakach. Następna część rozdziału jest poświęcona dynamicznemu sterowaniu orbitalnym momentem pędu w wirze optycznym przy zachowaniu poprzecznego rozkładu natężeniowego wiązki z zastosowaniem modulatorów pracujących w trybie amplitudowym. Doktorant uzyskał eksperymentalnie szereg wiązek światła strukturyzowanego superpozycji wiązek Gausowskich, Bessela oraz Laguerra-Gausa z wirami o różnych ładunkach topologicznych zgodnych z przewidywaniami opisanymi we wcześniejszych pracach teoretycznych. Uzyskane wyniki są istotne do zastosowań wiązek strukturalnych w pułapkowaniu, gdzie niezależna manipulacja ładunkiem i natężeniem jest istotna przy manipulacjach złożonymi molekułami. Ostatnia część rozdziału porusza niezwykle ciekawe zagadnienia informacji kwantowej i ich optycznych implementacji: w tym przypadku równoległego porównywania ciągów danych bez identyfikacji ich zawartości. Autor zaimplementował bramkę Fredkina przy zastosowaniu dwóch wirów optycznych o przeciwnych ładunkach oraz polaryzacji jako sygnału sterującego. Wyniki eksperymentalne wykazały możliwość implementacji optycznej założonego układu przy zastosowaniu deformowanego zwierciadła (DMD) jako przestrzennego modulatora do generacji wirów optycznych przenoszących informację o wartości ciągów 40 bitowych ciągów danych do analizy. Otrzymane wyniki eksperymentalne były zgodnie z symulacjami.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

Rozprawę doktorską kończy dość syntetyczne ale poprawne podsumowanie wyników przeprowadzonych badań oraz dodatek stanowiący podręcznik do opracowanego przez Autora oprogramowania użytkowego. Należy przyznać, że pakiet oprogramowania jest bardzo bogaty, może służyć do generacji szerokiej gamy wiązek strukturyzowanych, zawiera moduły poprawy jakości generowanych wiązek oraz został przetestowany i dopasowany do kilku powszechnie stosowanych przestrzennych modulatorów światła.

Przedstawioną przez pana Mateusza Szatkowskiego pracę oceniam bardzo wysoko. Praca stanowi ważny element aktualnych badań światowych dotyczących zastosowania przestrzennych modulatorów światła do kształtowania wiązki. Przestrzenne modulatory światła są obecnie powszechnie używane aby modyfikować rozkład natężenia i fazy w układach fonicznych. Ze względu na swoją konstrukcję i ograniczenia technologiczne bezpośrednio uzyskanie pożądanego frontu falowego nie jest możliwe. Dlatego powszechnie stosuje się wiele metod interaktywnych, które poprawiają jakość uzyskiwanych wiązek. Jednak większość metod jest obciążona różnymi niedoskonałościami, które trudno ze sobą porównać. Praca mgr Szatkowskiego podejmuje ważny temat opracowania obiektywnych testów jakości wiązek generowanych przez przestrzenne modulatory światła i pozwala na ich obiektywne porównanie. W pracy Doktorant zaproponował zastosowanie do tego celu dynamicznych wirów optycznych. Opracowana metoda została szczegółowo opisana w rozprawie oraz zweryfikowana eksperymentalnie przez doktoranta na przykładzie różnych rodzajów przestrzennych modulatorów światła w 2 ośrodkach: w macierzystym to jest na Politechnice Wrocławskiej oraz zagranicznym - Politechnice w Monterrey w Meksyku (Technologico de Monterrey). Dopracowanie techniki generacji wirów optycznych z użyciem modulatora SLM pozwoliło na weryfikację teoretycznych wyników dotyczących zachowania układów wirów optycznych uzyskanych na Wschodnioukraińskim Uniwersytecie Narodowym im. Wołodymyra Dała (Volodymir Dahl East Ukrainian University).

Dodatkowo wymiernym i praktycznym wynikiem prac badawczych mgr Szatkowskiego jest opracowanie przez niego oprogramowania użytkowego do kształtowania wiązek strukturyzowanego światła przez przestrzenne modulatory światła z zastosowaniem algorytmów korygujących niedoskonałości modulatorów. Oprogramowanie przeznaczone do



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

korekty jakości generowanych wiązek jest oparte na algorytmach Gerchberga-Saxtona oraz wielomianach Zernike. Oprogramowanie jest dostępne bezpłatnie i przeznaczone do pracy w środowisku Matlab.

Rozprawa 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 Doktoranta. Jednak, jak każda rozprawa doktorska, niniejsza praca zawiera również pewne niedoskonałości, które pozostawiają przy jej czytaniu pewien niedosyt. We wstępie i Rozdziale 1 zabrakło mi dobrze opisanej motywacji podjęcia tematu udokumentowanej szerszym niż przedstawiony stanem wiedzy. Poszczególne fragmenty, które stanowią opis motywacji podjęcia badań znajdują się w pracy, ale są rozproszone w rozdziałach 2-4, co znacznie utrudnia docenienie znaczenia tematu podjętego przez Doktoranta.

W Rozdziale 1 poświęconym strukturyzacji światła przez przestrzenne modulatory światła Doktorant opisał tylko jeden rodzaj strukturyzacji, wiry optyczne. Zabrakło mi w tym rozdziale szerszego spojrzenia na zagadnienie strukturyzacji i choćby skrótowe przedstawienie innych jej rodzajów oraz ich głównych cech. Pozwoliłoby to także autorowi lepiej podkreślić szczególne właściwości wirów optycznych, które wykorzystuje w dalszej części pracy.

Pewien niedosyt w pracy pozostawia brak przedstawienia szerszego kontekstu wyników badań. W ostatnim rozdziale doktoratu oczekiwałbym porównania wyników osiągniętych przez Autora pracy ze stanem wiedzy, w szczególności z pracami Y. Liang *et al.*, Appl. Opt. 57, 3618 (2018) – ref. [36] oraz A. Jesacher *et al.* Opt. Express 15, 5801 (2007) – ref. [47]. Krótka, syntetyczna analiza otrzymanych wyników i zestawienie ich z wynikami dotychczas opublikowanymi przez inne grupy badawcze, ułatwiłoby docenienie osiągnięć przez Doktoranta, które są niepodważalne.

Z pozostałych drobnych błędów chciałbym zwrócić jeszcze uwagę na następujące: na str. 15 w równaniu (1.13) Doktorant posługuje się niezdefiniowanymi jednoznacznie w tekście



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

symbolami; równania odnoszące się do wykorzystania wielomianów Zernike (1.9) powinny być poprzedzone odnośnikiem do źródła, ładunek wirów optycznych jest oznaczany różnymi symbolami w poszczególnych rozdziałach; wartości parametru Z^{-2}_2 na rys. 3.16 oraz w tekście na str. 51 nie są zgodne.

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.

Uzyskane wyniki stanowią oryginalny i istotny krok w rozwoju metod diagnostyki jakości generacji wiązek strukturyzowanych przez przestrzenne modulatory światła oraz metod generacji wiązek światła strukturyzowanego. Oprogramowanie użytkowe napisane i udostępnione do publicznego użytku przez mgr Szatkowskiego pozwoli na korzystanie z wyników jego pracy przez wielu studentów, inżynierów i naukowców. Prace badawcze Doktoranta zostały docenione przez środowisko naukowe, o czym świadczy jego 7 prac opublikowanych w uznanych czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym z IF oraz ich pierwsze cytowania obce pomimo krótkiego czasu jaki upłynął od ich publikacji.

Mając na uwadze bardzo aktualną tematykę pracy, jej potencjał praktyczny oraz wysoki poziom naukowy rozprawy wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej magistra Mateusza Szatkowskiego. W szczególności na wyróżnienie zasługują prace nad zastosowaniem do badania jakości wiązki optycznej dynamicznej metody śledzenia trajektorii punktu osobliwego w próbującej wiązce wiru optycznego. Doktorant wykazał, że niewielkie zmiany astygmatyzmu wpływają znacząco na zmiany kierunku osi trajektorii przemieszczania się środka wiru oraz na zmiany kąta przecięcia osi trajektorii przy zmianie położenia wiru w prostopadłych płaszczyznach względem osi optycznej układu. Wyniki powyższych prac badawczych stanowią istotny wkład w rozwój metrologii optycznej i poprawy jakości wiązek strukturalnych generowanych przez przestrzenne modulatory światła. Metoda ta jest bardzo czuła i może być zastosowana do oceny jakości wiązki w praktycznych układach bez konieczności budowy dodatkowych układów interferometrycznych. Powyższe badania zostały



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki
Instytut Geofizyki

opublikowane w jednym z najlepszych czasopism naukowych w dziedzinie metrologii optycznej na świecie: *Optics and Laser in Engineering* (IF= 4.273).

Uważam, że dotychczasowy dorobek mgr inż. Mateusza Szatkowskiego spełnia 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 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, 10.09.2020


Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński