



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

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
Dynamic Correction of Optical Aberrations of Spatial Light Modulator in
Holographic Projector"
mgr inż. Jana Bolka

Rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom aberracji monochromatycznych i ich możliwości korekty w projektorach holograficznych wykorzystujących przestrzenne modulatory światła. Praca obejmuje szeroko zakrojony zakres prac numerycznych związanych z opracowaniem i implementacją algorytmu korekty oraz eksperymentalnych, w których algorytm został przetestowany na rzeczywistym układzie projektora. Praca powstała pod kierunkiem dr. hab. inż. Michała Makowskiego, prof. ucz. na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

W rozprawie Autor zbadał aberracje wprowadzane przez przestrzenne modulatory światła przy zastosowaniu oświetlenia monochromatycznego, opracował i zaimplementował algorytmy numeryczne przeznaczone do ich dynamicznej korekty, a następnie opracował metodę oceny rzeczywistych aberracji i wykorzystał ją do eksperymentalnego zweryfikowania efektywności zaproponowanej przez siebie metody korekcji. Przedstawiona rozprawa zawiera szczegółowy opis przeprowadzonych prac numerycznych i eksperymentalnych. Optymalizacja jakości projektorów holograficznych jest istotnym wyzwaniem przy ich upowszechnianiu.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Układy bezsoczewkowe wykorzystujące właściwości modulatorów do kształtowania fazy frontu falowego do jednoczesnego wyświetlania hologramów syntetycznych i funkcji soczewki są jednym z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju projektorów, nie tylko ze względu na obniżenie ceny, ale także na możliwość stosowania prostych kompaktowych układów przeznaczonych do wykorzystania w systemach rozszerzonej rzeczywistości. Zagadnienie opracowania nowych, prostych metod korekty jakościowych ograniczeń sprzętowych przestrzennych modulatorów światła jest jednym z najważniejszych aktualnych tematów badawczych w dziedzinie projektorów bezsoczewkowych. Przedstawione wyniki dotyczące opracowania takich algorytmów korekcy aberracji są oryginalne i mogą mieć istotny wpływ na rozwój nowych rodzajów projektorów holograficznych.

Praca doktorska mgr inż. Jana Bolka zawiera m.in. wyniki opublikowane w roku 2019 w renomowanym w dziedzinie optyki czasopiśmie *Optics Express* indeksowanym przez Web of Science w pierwszym kwartyli i posiadającym wysoki współczynnik $IF= 3.894$. Doktorant jest pierwszym z dwóch autorów powyższej publikacji, co świadczy o jego wiodącej roli w opublikowanych badaniach. Praca zatytułowana „*Non-invasive correction of thermally induced wavefront aberrations of spatial light modulator in holographic projection*” zawiera ważne wyniki eksperymentalne dotyczące możliwości dynamicznej korekty aberracji termicznych pojawiających się w przestrzennych modulatorach światła przy zmianach temperatury otoczenia. Publikacja była dotychczas cytowana 3 razy, z czego jedno cytowanie nie pochodzi od współautorów. Stosunkowo niska liczba cytowań świadczy to o niewielkim dotychczasowym zainteresowaniu środowiska i wpływie opublikowanej pracy na rozwój dziedziny. Niewielka liczba cytowań jest prawdopodobnie związana z bardzo specjalistycznym tematem pracy i krótkim czasem jaki upłynął od jej publikacji. Doktorant jest także współautorem dwóch publikacji pokonferencyjnych związanych z prezentacjami na międzynarodowych konferencjach stowarzyszenia OPTICA związanymi tematycznie z niniejszą rozprawą doktorską oraz współautorem 3 prac opublikowanych w latach 2019 -2022 niezwiązanych bezpośrednio z tematem doktoratu. Dwie prace opublikowane w uznanych czasopismach *Optics Letters* oraz *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials* dotyczą



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

Wydział Fizyki

materiałów opto-magnetycznych natomiast trzecia praca opublikowana w ACS Nano (IF=15,881) dotyczyła badań nad nanomateriałami ciekłokrystalicznymi.

Doktorant przyjął dość nietypową formę rozprawy, w której nie postawił w sposób sformalizowany tezy. Niemniej we wstępie Autor zdefiniował, że celem rozprawy jest udowodnienie możliwości pomiaru oraz szybkiej i precyzyjnej korekty aberracji wprowadzanych przez przestrzenne modulatory światła umożliwiające działanie urządzenia w przybliżeniu w limicie dyfrakcyjnym. Przyjmując cel rozprawy jako jej tezę należy stwierdzić, że wszystkie elementy tezy zostały systematycznie zbadane w ramach niniejszej rozprawy i pozytywnie zweryfikowane.

Praca doktorska mgr inż. Jana Bolka składa się z dwóch części. Pierwsza część pracy, na którą składają się rozdziały 1 i 2 stanowi wprowadzenie merytoryczne do pracy obejmujące motywację podjęcia tematu, wprowadzenie podstawowych pojęć oraz przegląd wiedzy w dziedzinie rozprawy. Druga część pracy, obejmująca rozdziały od 3 do 5 oraz wnioski końcowe zawarte w rozdziale 6, przedstawiają oryginalne wyniki badawcze Doktoranta.

Rozdział Wstęp jest bardzo krótki i stanowi formalny wstęp do pracy, zawiera cel pracy oraz opis jej struktury. Rozdział 1 zawiera opis koncepcji rozważanego bezsoczewkowego układu holograficznego projektora oraz motywacje podjęcia tematu. Autor przedstawił symulacje wpływu aberracji na postać funkcji rozmycia punktu oraz standardowe testy rozdzielczości w szczególności przy zastosowaniu oświetlenia monochromatycznego koherentnego rozważanego do zastosowania w wyświetlaczach holograficznych.

W rozdziale 2 Doktorant wprowadził wszystkie podstawowe pojęcia związane z opisem aberracji na postawie skalarnej teorii dyfrakcji oraz opis formalny fazowych hologramów generowanych komputerowo. Następnie przedstawiono budowę i działanie w trybie czysto fazowym ciekłokrystalicznych przestrzennych modulatorów światła. W ostatniej części rozdziału przedstawiono bardzo skrótowo stan wiedzy dotyczący badania i korekty aberracji wprowadzanych do układu optycznego przez przestrzenne modulatory światła. Rozdział stanowi bardzo dobre wprowadzenie do tematyki doktoratu. W sposób przystępny wprowadza podstawowe wzory skalarnej teorii dyfrakcji. Bardzo dobry pod względem dydaktycznym jest



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

Wydział Fizyki

rozdział opisujący ograniczenie dyfrakcyjne oraz metody pomiaru rozdzielczości przestrzennej oraz aberracji w układach optycznych. Rozdział ten świadczy o bardzo dobrym zrozumieniu podstaw fizycznych zjawisk związanych aberracjami przez Doktoranta.

Rozdział 3 zawiera pełny opis metody określania aberracji i jej korekty zaproponowanej przez Doktoranta. Doktorant przedstawił szczegółową koncepcję oceny aberracji za pomocą analizy przestrzennej funkcji rozmycia punktu przy wykorzystaniu wyświetlania soczewki fazowej o zmiennej ogniskowej na przestrzennym modulatorze światła analizując zalety i ograniczenia zaproponowanej metody. Rozdział zawiera także jakościową analizę wpływu wyboru parametrów geometrycznych układu na dokładność oraz złożoność obliczeniową metody. Doktorant zaproponował funkcje oceny opartą na ocenie różnic między bieżącym a oczekiwanym rozkładem frontu falowego. Niestety sama funkcja oceny M_{thr} nie została zdefiniowana w sposób ścisły, tylko wyłącznie opisowo. Ostatnia część rozdziału zawiera szczegółowy opis zbierania obrazów funkcji rozmycia punktu z trzech płaszczyzn oraz algorytmu odzyskiwania fazowego rozkładu przestrzennego aberracji opartego na algorytmie Gerchberga-Saxtona.

Rozdział 4 zawiera wyniki weryfikacji poprawności zaimplementowanego algorytmu. Doktorant przeanalizował poprawność algorytmu przedstawiając wyniki jego działania dla serii 100 losowo wygenerowanych aberracji na podstawie wielomianów Zenikego. Jako zmienne przyjęto odległości pomiędzy płaszczyznami obrazów dla funkcji rozmycia punktu testowanych przypadków oraz liczbę płaszczyzn z których zbierany jest obraz do odzyskiwania informacji o aberracjach. Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowanie odległości 25 mm pomiędzy płaszczyznami zbierania obrazów funkcji rozmycia punktu daje najlepsze wyniki. Ponadto Doktorant wykazał, że zaimplementowany algorytm korekty aberracji działa poprawnie i efektywnie przy wprowadzeniu informacji wejściowych o rozkładzie funkcji rozmycia punktu w co najmniej trzech płaszczyznach. Należy jednak zwrócić uwagę, że powyższe parametry zostały zoptymalizowane wyłącznie dla rozważanego układu projektora o ściśle określonych rozmiarach geometrycznych i dla wybranego przestrzennego modulatora światła. Można odczuwać niedosyt braku uogólnionej analizy



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

otrzymanych wyników i braku przełożenia wyników symulacji na wnioski dotyczące całej klasy bezsoczewkowych projektorów holograficznych.

Rozdział 5 stanowi najważniejszy rozdział rozprawy doktorskiej mgra Jana Bolka i przedstawia wyniki eksperymentalne zastosowania opracowanego algorytmu do korekty aberracji wprowadzanych przez rzeczywisty przestrzenny modulator światła do układu optycznego. Aby zweryfikować poprawność działania algorytmu w obecności różnych aberracji prace eksperymentalne przeprowadzono dla SLM pracującego w różnych temperaturach, co pozwoliło na zasymulowanie większej liczby przypadków z różnymi aberracjami oraz identyfikację typów występujących aberracji poprzez przeprowadzenie ich rozkładu na współczynniki wielomianu Zernikego. Przedstawione przez Doktoranta wyniki eksperymentalne wskazują, że opracowana metoda skutecznie eliminuje wszystkie aberracje i działanie skorygowanego układu jest bliskie ograniczeniu dyfrakcyjnemu. Doktorant dokonał bezpośredniej analizy poprzez bezpośrednie porównanie rozkładu natężenia funkcji rozmycia punktu dla idealnego referencyjnego bezaberracyjnego układu optycznego z rozkładem rzeczywistym.

Następnie działanie algorytmu przetestowano na standardowych testach rozdzielczości USAF dla wiązki monochromatycznej uzyskując po korekcie rozdzielczość 2.4 pary linii na milimetr. Doktorant wykazał również konieczność dopasowania stosowanych poprawek rozkładu fazy korygujących aberracje do zmian temperatury pracy SLM, gdyż zmiana jego temperatury pracy o 1 stopień powodowała już znaczące obniżenie rozdzielczości wyświetlanego obrazu. Ostatnia część rozdziału jest poświęcona weryfikacji korekty aberracji obrazów RGB w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy projektora, gdzie wszystkie 3 barwy są wyświetlane jednocześnie tworząc docelowy obraz barwny dla standardowych testów rozdzielczości oraz wybranego obrazu testowego. Przedstawione wyniki potwierdziły efektywność zaimplementowanych algorytmów do korekty aberracji w obrazach barwnych, a otrzymana eksperymentalnie jakość obrazów odpowiada przewidywanym wynikom symulacji.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Ostatni Rozdział 6 zawiera krótkie podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych i wykazanie osiągnięcia celów rozprawy doktorskiej. Rozdział niestety nie zawiera analizy wpływu osiągniętych wyników na rozwój projektorów holograficznych oraz propozycji kolejnych etapów badań, które mogą stanowić rozwinięcie wyników przedstawionych w rozprawie doktorskiej.

Przedstawioną przez mgr inż. Jana Bolka rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Praca zawiera nowe, wartościowe wyniki dotyczące metod pomiaru i dynamicznej korekty aberracji monochromatycznych przestrzennych modulatorów światła w układach projektorów holograficznych. Doktorant zaproponował własny algorytm do korekty aberracji i skutecznie zaimplementował go w rzeczywistym układzie projektora. Po przeprowadzeniu charakteryzacji jakości wyświetlanych obrazów wykazał pełną skuteczność wprowadzonych korekcyj i otrzymał działanie zbliżone do limitu dyfrakcyjnego. Na uznanie zasługuje równoczesne przeprowadzenie prac dla wszystkich 3 komponentów barwnych RGB projektora i weryfikacja jego działania na kolorowych obrazach i wzorcach rozdzielczości. Otrzymane wyniki mają dużą wartość poznawczą w opisywaniu zjawisk samoorganizowania ciekłych kryształów oraz duży potencjał praktyczny do zastosowania m.in. jako dynamicznie modyfikowane i odwracalne jednowymiarowe kryształy fotoniczne w rekonfigurowanych i czujnikowych układach światłowodowych. Praca stanowi ważny element aktualnych badań światowych dotyczących optymalizacji kompaktowych, bezsoczewkowych projektorów holograficznych opartych na przestrzennych modulatorach światła. Otrzymane wyniki są oryginalne, ważne dla rozwoju całej klasy projektorów holograficznych bezsoczewkowych i mają ważny aspekt praktyczny związany z ich wdrożeniem na rynek.

Praca jest napisana bardzo starannie. Nie zawiera ona istotnych błędów merytorycznych ani formalnych. Wszystkie analizy w rozprawie 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. Wśród niewielkich błędów chciałem zwrócić uwagę na brak rozwinięcia skrótu rodzaju błędów RMS przy zdefiniowaniu funkcji oceny, a na Rys. 5.5. brakuje opisu osi Y. Należy także zauważyć, że



Autor nie podaje skali na większości rysunków zawierających obrazy. W wielu przypadkach ta informacja nie jest niezbędna do śledzenia treści rozprawy, ale w niektórych przypadkach m.in. rys. 5.12 podanie skali jest wskazane.

W samej przedstawionej rozprawie doktorskiej zabrakło także jasno wskazanego wkładu własnego doktoranta. Niewątpliwie prace numeryczne i eksperymentalne przedstawione w rozdziałach 4 i 5 są wykonane i opracowane przed Doktoranta. Natomiast brakuje informacji na temat udziału Doktoranta i ewentualnie Promotora w rozwoju koncepcji algorytmów i metodologii prac badawczych.

Duża niedogodność w odbiorze pracy stanowią zbyt małe rysunki 5.22-28. W ocenie wyników pracy przez czytelnika rozprawy kluczową rolę odgrywa możliwość porównania rysunków testów kolorów USAF oraz wybranego obrazu testowego przedstawione dla przypadków z korekta dynamiczna aberracji oraz bez niej. Niestety w formacie wydruku rys. 5.22-28 są zbyt małe, aby porównać ich jakość i czytelnik jest zdany wyłącznie na interpretację Autora pracy.

Przeważającą część oryginalnej pracy Doktoranta stanowią prace numeryczne. Ze względu na ich charakter pracy nie oczekuję od Doktoranta opisywania pełnej implementacji numerycznej algorytmu oraz szczegółowego opisu tego procesu. Natomiast ta niewątpliwie żmudna praca nie bardzo odnalazła odzwierciedlenie w rozprawie. Doktorant tylko przedstawił koncepcje algorytmu oraz przeanalizował wyniki jego stosowania do korekty aberracji w projektorze holograficznym. Brakuje mi informacji o przeznaczeniu opracowanego algorytmu i oprogramowania, które ma wysoką wartość praktyczną i edukacyjną. Oprogramowanie mogłoby być stosowane przez innych badaczy i studentów do rozwijania ich własnych implementacji. Jeśli przewidziane jest inne zastosowanie opracowanego algorytmu, to korzystne byłoby udostępnienie w ramach rozprawy wersji demo przeznaczonego do celów edukacyjnych lub aneks do pracy zawierający kody lub opisy blokowe do najważniejszych procedur stanowiących oryginalne osiągnięcie Doktoranta.

W pracy brakuje ścisłej definicji funkcji oceny (merit function). W rozdziale 3.3.6 jest ona definiowana jako M_{thr} , ale brak jest jej jawnego opisu wzorem. W Rozdziale 4 jako



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

funkcje oceny podawana jest błąd RMS. W konsekwencji w rozdziale 6 Doktorant przedstawia kluczowe wyniki do oceny poprawności korekty aberracji na Rys. 5.5, który przedstawia wartość funkcji oceny dla kolejnych kroków iteracyjnych, którą trudno samodzielnie zinterpretować. Analiza tych wyników przedstawiona przez Doktoranta jest także zbyt ogólna i odnosi się wyłącznie do jakościowych wniosków. Brakuje informacji co oznacza, że funkcja jakości przyjmuje wartość poniżej 0.1 i co oznacza wskazanie wartości progowej na poziomie 0.15.

Słabszą stroną pracy jest bardzo skrótowe przedstawienie stanu wiedzy w zakresie dotychczas stosowanych metod do charakteryzacji i korekty aberracji w przestrzennych modulatorach światła. Rozdział 2.7 poświęcony temu tematowi zajmuje jedną stronę i ogranicza się wyłącznie do podania literatury i ogólnego przedstawienia koncepcji bez ich analizy i porównania. Jest to niewystarczające, aby przedstawić stan wiedzy w dziedzinie, w której Doktorant prowadzi badania. W konsekwencji zaimplementowany algorytm i osiągnięte wyniki nie zostały przeanalizowane w stosunku do innych znanych rozwiązań. Jako recenzent na podstawie rozprawy przyjmuję bez zastrzeżeń, że Doktorant samodzielnie rozwiązał problem aberracji w przestrzennych modulatorach światła stosowanych do bezsoczewkowych projektorów holograficznych natomiast nie sposób ocenić na ile oryginalne i przełomowe jest to osiągnięcie. Na podstawie bardzo krótkiego Rozdziału 6 można jedynie upatrywać zalety w szybkości działania algorytmu dzięki jego implementacji na procesorach w kartach graficznych, choć nie podano żadnych danych liczbowych odnośnie czasów działania algorytmu korekty oraz estymacji możliwości jego zastosowania w przestrzennych modulatorach światła o częstotliwości odświeżania wyższej niż 60 Hz.

Doktorant w rozważaniu aberracji potraktował system projektora holograficznego jako całość. Interesujące jest na ile aberracje w wyświetlanym obrazie pochodzą od niedoskonałości przestrzennego modulatora światła, a na ile od układu oświetlającego modulator. Być może głównym źródłem aberracji nie jest SLM, tylko układ oświetlający i nie jest potrzebna dynamiczna korekta aberracji układu, tylko wyższej jakości wiązka oświetlająca układ modulatora. W opisie problemu zabrakło informacji o aberracjach wprowadzanych przez układ oświetlający i dyskusji o źródłach aberracji.



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

Wydział Fizyki

Kolejna moja wątpliwość dotyczy metodologii pomiarów. W pracy Doktorant zbiera informacje o funkcji rozmycia w różnych płaszczyznach nie za pomocą zbierania obrazów w różnych płaszczyznach (rys. Rys. 3.1) tylko poprzez zmianę parametrów wyświetlanej soczewki na przestrzennym modulatorze soczewki (rozdział 3.1). W opisie metody pomiarowej brakuje analizy czy zmiana parametrów hologramu wyświetlanej soczewki fazowej nie wpływa na aberracje przestrzennego modulatora światła w czasie pomiaru, biorąc pod uwagę analizę źródeł aberracji w SLM przedstawiona w rozdziale 2.6.

W opisie zalet zaproponowanej metody (Rodził 3.1.1.) słusznie zwrócono uwagę na konieczność zapewnienia liniowości odpowiedzi kamery przy zbieraniu obrazów m.in. funkcji rozmycia punktu. Jednak w Rozdziale 5 nie ma przedstawionych wyników kalibracji układu pomiarowego wskazujących na zapewnienie liniowej odpowiedzi kamery.

Powyższe uwagi dotyczą słabszych elementów przedstawionej pracy w subiektywnej ocenie recenzenta, ale nie podważają w żaden sposób mojej wysokiej oceny rozprawy doktorskiej jako całości oraz ważnych i oryginalnych osiągnięć badawczych Doktoranta.

Uzyskane wyniki stanowią oryginalny i istotny krok w rozwoju bezsoczewkowych projektorów holograficznych. Opracowanie oprogramowania, które umożliwia skuteczną korektę aberracji całego układu optycznego projektora stanowi nie tylko osiągnięcie własne Doktoranta, ale posiada również istotne znaczenie praktyczne, pozwalające na komercjalizację własnych systemów projektorów holograficznych.

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska oraz dotychczasowy dorobek naukowy mgr inż. Jana Bolka spełniają warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych i mogą być podstawą do ubiegania się o stopień doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Warszawa, 30.07.2022

prof. dr hab. Ryszard Buczyński
Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński