



# Politechnika Warszawska

## Wydział Fizyki



[www.fizyka.pw.edu.pl](http://www.fizyka.pw.edu.pl)

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

Warszawa, 13 sierpnia 2019 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Maksymiliana Chlipały  
pt.: "System barwnego holograficznego wyświetlacza 3D o szerokim kącie pola widzenia z  
oświetleniem niekoherentnym"

Holografia komputerowa stanowi coraz lepsze narzędzie do formowania optycznych frontów falowych w celu wyświetlania trójwymiarowych pól natężeniowych. Wśród aktualnych tematów badawczych w tym polu można wyróżnić chęć poszerzenia pola widzenia i źrenicy wyjściowej oraz lepsze oddawanie kolorów przy jednoczesnej redukcji widoczności pola spekulowego. Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Maksymiliana Chlipały doskonale wpisuje się w tę działalność i demonstrowa istotny element nowości dobrze osadzony w stanie wiedzy.

Licząca łącznie 114 stron praca gromadzi wyniki zaprojektowanych i wykonanych przez doktoranta eksperymentów mających na celu pokazanie możliwości dyfrakcyjnego wyświetlania barwnych obrazów w czterech różnych konfiguracjach eksperymentalnych. Tym samym nieco chybiony jest sam tytuł pracy, który raczej powinien dotyczyć „systemów”, nie jednego systemu wyświetlacza. Wspólnym mianownikiem w/w konfiguracji doświadczalnych jest układ 4-f realizujący uprzednio opublikowaną przez zespół Li w 2013 roku i Moon w 2014 roku metodę kodowania amplitudy zespolonej przy użyciu fazowego przestrzennego modulatora światła (SLM). W rezultacie dostępna stała się rekonstrukcja holograficzna zespolonego pola w zerowej lub niewielkiej odległości od modulatora. Oryginalnym pomysłem doktoranta było zastosowanie wymienionej metody do kodowania jednocześnie trzech barw składowych RGB, co w połączeniu z odpowiednią filtracją w płaszczyźnie fourierowskiej układu 4-f pozwoliło na uzyskanie wysokiej jakości odtworzeń barwnych. Jednocześnie ze względu na praktycznie zerową odległość pomiędzy płaszczyzną SLM a płaszczyzną odtworzenia udało się ograniczyć widoczność dyspersji (chromatyzmu) siatek dyfrakcyjnych składających się na wyświetlony hologram i tym samym zademonstrować poprawne oddawanie koloru nawet dla źródła szerokopasmowego typu LED. Jest to niewątpliwie znaczące osiągnięcie, które znajduje odzwierciedlenie w dużej i rosnącej liczbie cytowań artykułu [57].

Praca ma charakter zdecydowanie eksperymentalny. Ma adekwatną długość i jasną strukturę. W osobnych rozdziałach autor zawarł bardzo dobre omówienie stanu wiedzy oraz krótki wywód podsumowujący osiągnięcia i nakreślający dalsze kierunki badań. Nieco dziwi bardzo zdawkowe podsumowanie tak ogromnej pracy eksperymentalnej, mieszczące się na półtorej stronie. Autor zawarł klarowny opis elementów nowości zawartych w rozprawie. Niestety nie został jawnie określony wkład osobisty mgr. inż. Chlipały w poszczególne osiągnięcia i to wymaga doprecyzowania.



# Politechnika Warszawska

## Wydział Fizyki



[www.fizyka.pw.edu.pl](http://www.fizyka.pw.edu.pl)

ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa; tel. +48 22 347 267; fax. +48 226 282 171

Recenzent zakłada jednak, że mała liczba współautorów kluczowych publikacji w *Optics Express* pozwala założyć znaczny udział mgr. inż. Chlipały w uzyskaniu przedstawianych wyników.

W rozdziałach 3, 4, 5, 6 opisano układy i doświadczenia optyczne prowadzące do coraz lepszego spełnienia wymagań barwnego wyświetlacza 3-D opartego na źródłach niekoherentnych, określonych w rozdziale „Cel pracy”. Swoją drogą fragment ten może stanowić zamiennik tezy rozprawy, ponieważ ta nie została jawnie sformułowana w pracy. Szkoda, że autor nie przedstawił tego typu myśli przewodniej, którą udowodnił następnie w kolejnych przybliżeniach przez świadomy wybór odpowiednich eksperymentów. Przez to nie da się oprzeć wrażeniu, że w pracy przedstawiono nieco przypadkowy zbiór eksperymentów. Przykładowo, metoda pokazana w rozdziale 6 jest motywowana chęcią poszerzenia pola widzenia lub/i redukcji spekli przez multipleksing czasowy na bardzo szybkim, binarnym modulatorze DMD – ale postęp ten nie został w rozprawie zademonstrowany.

Na pochwałę zasługuje duży zakres doświadczalny rozprawy, pokrywający cztery ambitne konfiguracje holograficzne, w których doktorant z sukcesem poszerzył pole widzenia zachowując możliwość wyświetlania obrazów przestrzennych z wykorzystaniem źródeł nie quasi-monochromatycznych. Jakość uzyskanych wyników jest bardzo wysoka a najlepiej widać to w wysokim kontraście zaprezentowanych barwnych fotografii odtworzeń holograficznych. Osiągnięcia te były sukcesywnie publikowane w wysoko klasyfikowanym czasopiśmie optycznym *Optics Express*, co potwierdza ich nowatorstwo i wysoką jakość opisu. Doktorant w żadnej z tych publikacji nie był jednak pierwszym autorem. W rozprawie zacytowanych jest 93 pozycji literaturowych – zarówno klasycznych jak i najnowszych, co świadczy o dobrej orientacji doktoranta w dziedzinie wiedzy. Prace autorskie są odpowiednio cytowane, jednak w rozprawie brakuje wielu szczegółów i ilustracji, które są jasne dopiero po lekturze w/w artykułów. Np. na stronie 41 pojawia się informacja o maksymalnej wartości amplitudy równej 0,55 bez żadnego odnośnika lub wytłumaczenia pochodzenia tej wartości; na rysunku 3-7 pojawia się skrót „FDM” bez wytłumaczenia w tekście rozprawy.

Właściwie cała praca bazuje na układzie optycznym, w którym odpowiednio spreparowane rozkłady fazowe (właściwy i sprzężony do niego) są wyświetlane obok siebie na SLM w celu dokonania ich interferencji w układzie 4-f, co ma dać możliwość odtworzenia amplitudy zespolonej. Z tego powodu uważam, że w rozprawie powinien znaleźć się porządny opis tej zasady działania, zawierający również jej ograniczenia i zakres stosowalności, np. w odniesieniu do wyświetlania obiektów o jedno-pikselowej szerokości, która może być problematyczna. W całej rozprawie nie ma też ilustracji pokazującej w powiększeniu rozkłady fazowe adresowane na SLM, co może być cenne dla specjalistów w dziedzinie. Przykładowo, po lekturze rozprawy nie jest jasne dlaczego operacja korekcji rozkładu amplitudy (w domyśle obwiedni wiązki typu Bessela) jest nazwana „operacją fazową” (rys. 3-7) i która część pola zespolonego jest konwertowana do poziomów szarości modulatora SLM. Te szczegóły, pomimo że obecne w zewnętrznych artykułach, powinny znaleźć się w rozprawie.





# Politechnika Warszawska

## Wydział Fizyki



[www.fizyka.pw.edu.pl](http://www.fizyka.pw.edu.pl)

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

Autor przytacza za literaturą twierdzenie, że rozdzielczość rekonstruowanych obrazów zależy w głównej mierze od koherencji źródła światła (str. 28, 51), ale w pracy nie zostały przedstawione żadne ilościowe informacje o rozdzielczości obrazowania. Np. na stronie 56 pojawia się zdawkowa informacja „Kątowa rozdzielczość wyświetlacza jest większa od kątowej rozdzielczości ludzkiego oka ( $1/60^\circ$ ).”, bez przedstawienia metodyki pomiaru, typu użytego testu rozdzielczości itp.. Ciężko w pracy naukowej zaakceptować informację o rozdzielczości w postaci zdania: „Możliwe jest nawet rozróżnienie faktury materiału, z którego uszyta jest spódnica.”. Tak samo informacja ze str. 67 o trzykrotnie zmniejszonej rozdzielczości w kierunku pionowym jest najwidoczniej tylko przypuszczeniem autora, bo nie przedstawił on nic na poparcie tej liczby. W ocenie recenzenta rozdzielczość obrazu będzie spadała wraz z usuwaniem z procesu kolejnych częstości przestrzennych np. w wyniku zwiększonej odległości między płaszczyzną rekonstrukcji a SLM. Taka analiza jednak nie została przeprowadzona. Ogólnie mówiąc, pobieżne potraktowanie w pracy zagadnienia rozdzielczości (rozumianej jako liczby rozróżnialnych punktów odtwarzanego obrazu) uważam za niefortunne. Tym bardziej, że w przypadku potencjalnego zastosowania proponowanych metod w holograficznych wyświetlaczach nagłownych zawartość informacyjna projektowanych obrazów jest sprawą kluczową. Oczywiście rozdzielczość nie znajduje się z tytule rozprawy i nie była głównym celem pracy, ale zachodzi przypuszczenie że spada ona wraz z użyciem kolejnych zabiegów poszerzających pole widzenia lub umożliwiających użycie źródeł LED.

Analogicznie, jedynie pobieżnie został omówiony wpływ spójności (konkretnie przestrzennej) źródła na geometryczne parametry odtwarzanego trójwymiarowego pola świetlnego. Praca bardzo zyskałaby na głębszej analizie tych zagadnień, nawet jeżeli zostały już one omówione w opublikowanych artykułach. Przykładowo, autor nie komentuje tego, że wyniki numerycznych rekonstrukcji z rozdziału 6 (rys. 6-9) pokazują odwrotny trend niż eksperyment, tj. jakość odtworzeń rośnie wraz z odległością propagacji.

Autor nie poświęcił wystarczającej uwagi uzasadnieniu chęci użycia źródeł niekoherentnych typu LED do wyświetlania holograficznego. Konfrontując LED z diodą laserową ta druga wypada korzystniej w wielu aspektach: wydajności energetycznej, odpowiedniej polaryzacji wiązki, spójności przestrzennej, korzystnej kolimacji itp. Przewagą LED jest zmniejszony kontrast pól speklowych wynikający z małej spójności czasowej, ale w rozprawie poświęcono temu tylko jedną ilustrację (rys. 6-17) z nadal widocznym intensywnym zaszumieniem i bez żadnej analizy ilościowej.

Metody holograficzne nakierowane na wyświetlanie treści np. w postaci gogli nagłownych powinny charakteryzować się możliwie wysoką wydajnością i tym samym małymi stratami światła. Doktorant podał zmierzone wydajności dla jednej z przedstawionych metod, nie dyskutując jednak o wydajności całkowitej procesu i o przyczynach strat światła. Przykładowo, na schematach układów pomiarowych pominięto polaryzatory diod LED, które z pewnością pogarszały całkowitą wydajność świetlną procesów. Należałoby w każdej z proponowanych konfiguracji eksperymentalnych podać wydajność dyfrakcyjną i całkowitą, najlepiej osobno dla składowych czerwonej, zielonej i niebieskiej.





# Politechnika Warszawska

## Wydział Fizyki



[www.fizyka.pw.edu.pl](http://www.fizyka.pw.edu.pl)

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

Ocena jakości rekonstrukcji barwnych jest w przytłaczającej większości jakościowa, nie ilościowa. Autor nie mierzy rozdzielczości, kontrastu, jednorodności, błędu RMS, kontrastu spekulowego itp. Przy tak dobrych rezultatach takie liczbowe porównania z dokonaniem innych zespołów znacznie poprawiłyby ocenę rozprawy. Nie zmienia to oczywiście faktu, że uzyskane wyniki są na światowym poziomie. W tym kontekście martwi jednak brak samokrytyki w stosunku do rezultatów eksperymentu z rozdziału 3, w którym rozjazd komponentów barwnych w rozogniskowanych fragmentach pola 3-D jest bardzo widoczny (np. rys. 3-15), asymetryczny (tylko w kierunku góra-dół) i tym samym nie przypominający typowych wyświetlaczy, do których jest przyzwyczajony potencjalny użytkownik. To mogą być cechy negatywnie rzutujące na praktyczne zastosowanie proponowanych metod np. w goglach, co autor sugeruje na str. 109 w rozdziale podsumowującym.

Praca napisana jest poprawną polszczyzną, ale razi w niej kilka uporczywie powtarzanych kalek z języka angielskiego („intensywność” zamiast „natężenie światła”), określeń żargonowych („znaki sąsiednich pikseli powinny być przeciwne”, str. 29) oraz notoryczne użycie słowa „wymiar” w znaczeniu „rozmiar” – np. str. 71 „wymiar rdzenia światłowodu”, „wymiar wiązki obiektowej”, „B<sub>CCD</sub> jest wymiarem kamery”. W rozprawie użytych jest też wiele niedostatecznie wyjaśnionych skrótów, np. „PHK” na str. 70. Recenzent zdaje sobie sprawę, że nomenklatura ta jest zapewne zgodna z artykułami p. Chłipały lub z nich zaczerpnięta, ale rozprawa doktorska jednak powinna stanowić pewną całość, dającą czytelnikowi kompletne informacje na poruszane tematy. Zdanie ze str. 73 „Efekt wymiaru szczeliny na rozdzielczość i głębię rekonstruowanych obiektów (...)” jest bodajże miejscem o największym zagęszczeniu błędów na znak drukarski - w holografii nie rekonstruuje się obektów – jest to domeną np. druku 3-D. W holografii rekonstruuje (odtwarza) się tylko obrazy tychże obiektów, nawet jeżeli mają charakter trójwymiarowy. Niestety w wielu miejscach w pracy autor daje wrażenie jakby utracił pewien tajemniczy duży przedmiot, który teraz rekonstruuje różnymi metodami, np. na str. 5 „(...) zademonstrowano system umożliwiający rekonstrukcję dużych obiektów rzeczywistych (...)”. W streszczeniu po angielsku pada jeszcze bardziej radykalne twierdzenie „Objects can be recreated at any distance (...)”, a na str. 77 dowiadujemy się, że „obserwowany przedmiot zaczyna być ucinany” itp.. Naturalnie wymienione potknięcia językowe i edytorskie nie umniejszają wysokiej merytorycznej wartości pracy.

Z pomniejszych uchybień w rozprawie można wymienić przykładowo:

- Str. 76: „monochromatyczne diody LED” – raczej quasi-monochromatyczne, ale to też grube przybliżenie. Autor miał na myśli zapewne „jednobarwne” diody LED w odróżnieniu od diod emitujących światło białe. W wielu miejscach w pracy źródła światła nazywane są monochromatycznymi, a takie źródła nie istnieją – w pracy naukowej powinno się określać np. lasery jako źródła światła quasi-monochromatycznego.



# Politechnika Warszawska

## Wydział Fizyki



[www.fizyka.pw.edu.pl](http://www.fizyka.pw.edu.pl)

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

- Nie jest zrozumiałe, dlaczego autor na rys. 5-14 porównuje fragmenty obrazu dla różnych odległości. Dużo lepsze byłoby pokazanie jak zmienia się fragment pola osobno dla skrajnych położeń:  $z=0$  i  $z=500\text{mm}$ .
- W równaniu (6-1) jako alfa i beta autor opisuje kąt padania i kąt odbicia. Czy nie chodzi jednak o kąt dyfrakcyjnego ugięcia w danym rzędzie dyfrakcji?
- Str. 90 – autor nie podaje definicji „rzędu informacyjnego” oraz kształtu tegoż.
- Nie sposób uwierzyć, że proponowane metody umożliwiają „odtworzenie obiektu w dowolnym położeniu i z dowolnym powiększeniem” – nawet jeżeli autor miał na myśli odtworzenie z hologramu obrazu obiektu, to jego położenie i powiększenie podlega jednak pewnym ograniczeniom związanym np. z długością fali światła użytego w procesie.
- Autor nie wprowadził definicji „przestrzeni koherencji źródła LED” (str. 27).
- Rys. 3-12: opisywany efekt widać bardzo słabo, można było zastosować podbicie kontrastu albo korekcję gamma.
- Rys. 3-13: nie wyjaśniono, dlaczego komponent czerwony jest w rzeczywistości widoczny jako pomarańczowy, pomimo że użyta dioda LED z pewnością oferowała dłuższe fale emitowanego światła a i w innych eksperymentach w rozprawie kolor czerwony jest doskonale widoczny.
- Strona 108: „zarówno fazowych jak i binarnych przestrzennych modulatorów światła” – to są dwa osobne parametry modulatora – wyróżniamy modulatora fazowe, amplitudowe lub mieszane i nie ma to nic wspólnego z ich binarną lub wielopoziomową modulacją. Na rynku istnieją np. modulatory fazowe binarne oparte na ferroelektrycznych ciekłych kryształach. W domyśle autorowi chodziło o modulatory DMD, które są amplitudowe binarne.

Zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym zadaniem recenzenta jest stwierdzenie, czy praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu, czy wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie „budowa i eksploatacja maszyn” oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Po zapoznaniu się z pracą mgr inż. Maksymiliana Chlipały nie mam wątpliwości, że wszystkie wymogi Ustawy są spełnione, a sama rozprawa napisana jest rzetelnie i świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu teoretycznym i praktycznym Doktoranta.

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie pracy doktorskiej mgr inż. Maksymiliana Chlipały oraz o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie biorąc pod uwagę poważny dorobek publikacyjny doktoranta, wysoki poziom dopracowania dużej liczby pokazanych



# Politechnika Warszawska

## Wydział Fizyki



[www.fizyka.pw.edu.pl](http://www.fizyka.pw.edu.pl)

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

---

eksperymentów oraz brak poważnych niedoskonałości merytorycznych wnioskuje o wyróżnienie pracy.

dr hab. inż. Michał Makowski, prof. uczelni  
Wydział Fizyki  
Politechnika Warszawska