



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
rozprawy doktorskiej
“Reduction of higher diffraction orders in reconstructions of
sampled Fourier holograms”
mgr inż. Joanny Starobrat

Rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom nad metodami ograniczenia powielania obrazów w rekonstrukcjach hologramów Fouriera w projektorach ciekłokrystalicznych 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 w rzeczywistym układzie wyświetlacza ciekłokrystalicznego. Praca powstała pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Andrzeja Kołodziejczyka na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

W rozprawie Autorka podejmuje ważny i aktualny problem jakości wyświetlanych obrazów w projektorach bezsoczewkowych wykorzystujących dynamiczne wyświetlacze ciekłokrystaliczne. Rozważana konstrukcja bezsoczewkowa, która wykorzystuje kodowanie fourierowskie do wyświetlania obrazów, jest rozwijana w czołowych ośrodkach badawczych akademickich i przemysłowych na świecie do budowy kompaktowych wyświetlaczy umożliwiających m.in. wyświetlanie obrazów bezpośrednio na siatkówce oka w układach rozszerzonej rzeczywistości. Jednym z podstawowych problemów, którego rozwiązanie jest



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

wyzwaniem, jest redukcja powielania obrazów. Powstawanie pasożytniczych obrazów jest związane z periodycznością matrycy ciekłokrystalicznej wyświetlacza. W swojej rozprawie doktorskiej mgr Starobrat przedstawia swoje oryginalne rozwiązania ograniczenia powielania obrazów w projektorach bezsoczewkowych w odniesieniu do stanu wiedzy w tej dziedzinie.

Rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Starobrat zawiera wyniki badań opublikowane w czterech pracach w latach 2020-2023 w renomowanych czasopismach naukowych w dziedzinie optyki z współczynnikiem IF: w *Optics Express*, *Optics Letters*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* oraz *Optics and Lasers in Engineering*. Doktorantka jest pierwszym autorem w 3 z powyższych prac, co świadczy o jego wiodącej roli w opublikowanych badaniach. W pracy „*Photomagnetic recording of randomized holographic diffraction patterns in a transparent medium*” opublikowanej w *Optics Letters* w 2020 roku przedstawiono wyniki dotyczące zastosowania losowości pozycji pikseli w wyświetlanym hologramie do redukcji pasożytniczych obrazów w wyższych rzędach dyfrakcyjnych. W pracach „*Suppression of spurious image duplicates in fourier holograms by pixel apodization of a spatial light modulator*” oraz „*Pixel-level phase filters for off-axis shifting of sinc envelope in holographic projection*”, opublikowanych odpowiednio w *Optics Express* w 2021 roku oraz w *Optics and Lasers in Engineering* w 2023 roku, przedstawiono wyniki prac numerycznych i eksperymentalnych dotyczące zastosowania apodyzowanych masek amplitudowych oraz fazowych do ograniczenia powielania obrazów w bezsoczewkowych projektorach fourierowskich. W pracy „*Overlapping effect in dense all-optical, point-by-point recording of holographic patterns in the ferrimagnetic alloy*” opublikowanej w *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* w 2022 roku, przedstawiono natomiast wyniki prac badawczych dotyczące zapisu dynamicznych hologramów w magneto-optycznych granatach i możliwości ich zastosowania w wyświetlaczach fourierowskich, jako ośrodka czynnego.

Opublikowane prace pokrywają w pełni zakres badań stanowiących ocenianą rozprawę doktorską. To oznacza, że wszystkie części rozprawy zostały już zweryfikowane przez niezależnych recenzentów pod kątem oryginalności i wartościowego wkładu w rozwój dziedziny, co nie jest powszechne dla prac doktorskich.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Zgodnie z bazą danych Web od Science publikacje związane z rozprawa doktorską były dotychczas cytowane 6 razy. Wszystkie cytowania pochodzą z prac współautorów powyższych publikacji. Niewielka liczba cytowań jest prawdopodobnie związana z bardzo specjalistycznym tematem pracy i krótkim czasem jaki upłynął od jej publikacji.

Doktorantka jest także współautorką 2 innych prac opublikowanych w recenzowanych czasopismach z IF, które nie są bezpośrednio związane z ocenianą pracą doktorską, oraz 7 publikacji pokonferencyjnych związanych z prezentacjami na międzynarodowych konferencjach organizowanych przez stowarzyszenia SPIE oraz OPTICA związanymi tematycznie z niniejszą rozprawą doktorską. Wszystkie publikacje mgr J. Starobrat indeksowane w Web od Science były dotychczas cytowane 11 razy, z czego 9 cytowań to cytowania obce pochodzące od współautorów powyższych prac.

Doktorantka postawiła tezę rozprawy że zredukowanie widoczności duplikatów obrazu w odtwarzanych hologramach Fouriera przy zastosowaniu jako wyświetlaczy ciekłokrystalicznych krzemowych przestrzennych modulatorach światła jest możliwe poprzez zmianę struktury pikseli w wyświetlaczu: zastosowanie subpikselowych masek apodyzowanych oraz randomizację położenia pikseli. Na podstawie analizy przedłożonej rozprawy stwierdzam, że wszystkie elementy tezy zostały systematycznie zbadane przed Doktorantką i pozytywnie zweryfikowane.

Praca doktorska mgr inż. Joanny Starobrat 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 oraz wprowadzenie podstawowych pojęć. Druga część pracy, obejmująca rozdziały od 3 do 5 oraz wnioski końcowe zawarte w rozdziale 6, przedstawiają oryginalne hipotezy badawcze i osiągnięte przez Doktorantkę wyniki.

Rozdział 1 stanowi formalny wstęp do pracy, zawiera cel pracy, opis jej struktury oraz krótkie wprowadzenie do rozwiązywanego problemu. Rozdział 2 zawiera opis podstawowych pojęć i modeli związanych ze skalarną teorią dyfrakcji, holografia i hologramami Fourierowskimi. Rozdział jest napisany w przystępny sposób i wprowadza wszystkie niezbędne pojęcia potrzebne do zrozumienia reszty rozprawy.



W rozdziale 3 Doktorantka przedstawiła proponowane przez siebie metody ograniczenia powielania w wyświetlanych hologramach za pomocą zastosowania apodyzowanych masek fazowych i amplitudowych zintegrowanych z wyświetlaczem oraz randomizacji położenia wyświetlanych pikseli. W rozdziale przedstawiono także opis założeń dla układu projektora, który uniemożliwia zgodnie z opisem Doktorantki zastosowanie innych znanych już rozwiązań problemu powielania obrazu wyjściowego. Ten rozdział pozostawia jednak pewien niedosyt gdyż koncepcje rozwiązań zostały wprowadzone tylko poprzez krótki opis i brakuje poglądowych schematów przedstawiających proponowane koncepcje. Utrudnia to znacząco zrozumienie koncepcji rozwiązań proponowanych przez Doktorantkę. Ponadto opis dotychczasowych rozwiązań sprowadza się do kilkudziesięciu komentarza bez żadnych szczegółów. Sprawia on wrażenie żywcem przeniesionego z opublikowanych prac w czasopiśmie. W przypadku rozprawy doktorskiej oczekiwałbym bardziej szczegółowego przedstawienia stanu wiedzy, analitycznego opisu istniejących rozwiązań oraz jasnego wskazania dlaczego istniejące rozwiązania nie mogą być zastosowane do problemu rozwiązywanego przez Doktorantkę. W szczególności oczekiwałbym bardziej szczegółowej analizy rozwiązań proponowanych przez H. Wang *et al.* [86] w zakresie masek apodyzowanych, oraz w pracach Li *at al.* [87] i Wei *at al.* [88] w zakresie quasi- losowości macierzy oraz porównania ich z koncepcjami rozwijanymi przez doktorantkę pod kątem nowości.

Rozdział 4 zawiera oryginalne wyniki prac Doktorantki nad ograniczaniem powielania wyświetlanych obrazów poprzez zastosowanie filtrów apodyzowanych amplitudowych oraz fazowych. Jako kryterium sukcesu przyjęto zwiększenie natężenia pola w pierwszym rzędzie ugięcia oraz organicznie natężenia obrazów w wyższych rzędach ugięcia. Prace obejmują symulacje numeryczne rozważanych koncepcji oraz ich weryfikacje eksperymentalne.

W przypadku apodyzacji amplitudowej rozważano zastosowanie macierzy siatek amplitudowych o Gaussowskim rozkładzie tłumienności. Siatki zostały wykonane przy zastosowaniu technologii zapisu wiązką elektronową o rozmiarach dostosowanych do używanego w eksperymentach przestrzennego modulatora światła SLM HOLOEYE PLUTO z pikselami o rozmiarach 8×8 mikrometrów. Aby zapewnić odpowiednie justowanie



w układzie charakteryzującym Doktoranta zastosowała optyczny układ pomocniczy $4f$ co umożliwiło pełną kontrolę położenia maski anodyzowanej względem modulatora. Wyniki modelowania opracowanego przez Doktorantkę układu wykazały możliwość prawie trzykrotnego podniesienia wydajności w pierwszym rzędzie przy jednoczesnym ponad 10-krotnym obniżeniu wydajności obrazowania w pasożytniczych wyższych rzędach ugięcia względem układu bez zastosowania apodyzowanej maski. Wyniki eksperymentalne potwierdziły zalety zastosowania maski apodyzowanej i niewiele odbiegały od wyników symulacji. W ten sposób Doktorantka potwierdziła korzyści płynące ze zastosowania anodyzacji amplitudowej. Do korzyści zaliczyła także niską wrażliwość maski na przesunięcia względem układu pikseli wyświetlacza, natomiast za istotną wadę tego rozwiązania wskazała obniżenie wydajności świetlnej układu ze względu na zastosowanie masek amplitudowych.

W drugim kroku Doktorantka badała poprawę jakości obrazowania przy zastosowaniu apodyzacji czysto fazowej. Zastosowanie apodyzacji fazowej pozwala na otrzymanie asymetrycznych rozkładów natężenia i optymalizowanie jakości wyświetlanego pojedynczego obrazu w pierwszym rzędzie ugięcia. W tym celu rozważane było zastosowanie masek binarnych o skokowym kroku fazy oraz ciągłej rozkładzie fazy od 0 do π . Rozważanie 2 rodzajów masek zostało słusznie podjęte przez Doktorantkę ze względu na znaczną różnicę w złożoności ich wykonania i implementacji w rzeczywistych układach. Maski z ciągłym rozkładem fazy wymagają zastosowania zawansowanych technologii, natomiast siatki binarne mogą być wykonane prostymi technikami litograficznymi lub nawet zaimplementowane softwarowo w samym przestrzennym modulatorze światła, choć to wiąże się z utratą rozdzielczości urządzenia i powiększeniem rozmiaru pojedynczego piksela. Doktorantka przeprowadziła symulacje dla przypadku zastosowania masek o ciągłej zmianie fazy oraz masek binarnych o skoku 0.5π oraz 0.65π optymalnych odpowiednio pod kątem maksymalizacji natężenia pola w wybranym obrazie w pierwszym rzędzie ugięcia oraz minimalizacji natężenia pola w obrazach powstających w wyższych rzędach dyfrakcyjnych. Wyniki symulacji wykonanych przez Doktorantkę wykazały w przybliżeniu pięciokrotną poprawę kontrastu dla wybranych obrazów w pierwszym rzędzie ugięcia względem obrazów bliźniaczych, a w przypadku zastosowania maski fazowej o rozkładzie ciągłym 10-krotny



kontrast. Jednocześnie wzrost natężenia pola w wybranym obrazie wzrósł o 70% w parowaniu do referencyjnego układu bez zastosowania apodyzowanej maski fazowej. Dla binarnych masek fazowych zostały następnie wykonane prace eksperymentalne. Maski apodyzowane w pracach eksperymentalnych zaimplementowano w postaci 2 rodzajów superpikseli 1×2 oraz 2×2 piksele modulatora SLM. Doktorantka przedstawiła na rys. 4.27 – 4.29 obrazy zarejestrowane na kamerze będące wynikiem wyświetlania hologramów Fouriera zakodowanych na modulatorze odpowiadającym obrazom przedstawionym na Rys. 4.20.

Przedstawione obrazy jednoznacznie wskazują na korzyści wynikające z zastosowania binarnych masek apodyzowanych pod kątem zwiększenia natężenia obrazów głównych względem obrazów ‘bliźniaczych’, jednorodności ich oświetlenia oraz redukcji natężenia w obrazach pasożytniczych w wyższych rzędach ugięcia.

Jednak przedstawione wyniki pozostawiają pewien niedosyt. Wnioskowanie na podstawie samych obrazów może być mylące jeśli nie jest znana kalibracja kamery. W szczególności czy kamera, którą rejestrowano zdjęcia ma czułość liniową i nie działa w trybie wysycenia. Nie udało mi się znaleźć informacji na ten temat w rozprawie. Ponadto przedstawione w tabelach 4.4. oraz 4.5 dane liczbowe odnoszą się tylko do porównania natężenia pola w obrazach bliźniaczych, nie ma natomiast ich porównania do natężenia w obrazach powielanych wyższych rzędów tak, jak Doktorantka przedstawiła w tabelach 4.1 i 4.2 dla symulacji i wyników eksperymentalnych dotyczących apodyzowanych masek amplitudowych,. Utrudnia to porównanie ilościowe wyników pomiędzy metodami masek fazowych i amplitudowych. Ponadto w wynikach eksperymentalnych (Tab. 4.4 i 4.5) otrzymano dla masek binarnych ze skokiem fazy 0.5 Pi kontrast równy 12 pomiędzy obrazem głównym a ‘pasożytniczym’ bliźniaczym, natomiast symulacje wskazywały na kontrast równy 5. Brakuje wyjaśnienia w rozprawie dlaczego wartości eksperymentalne kontrastu są znacznie wyższe niż przewidywane w symulacjach.

Podrozdział 4.2.7 dotyczy próby wykonania binarnej maski fazowej przy zastosowaniu metody druku 3D. Niestety jakość wykonania maski była bardzo niska i uniemożliwiła Doktorantce wykonanie eksperymentów z zastosowaniem rzeczywistej apodyzowanej maski



fazowej. Wydaje się, że zastosowanie wykonanie binarnej maski fazowej z wykorzystaniem klasycznej technologii fotolitografii byłoby znacznie prostsze i korzystniejsze dla weryfikacji eksperymentalnej apodyzowanych masek fazowych.

Ostatnia część rozdziału 4 przedstawia bardzo skrótowo koncepcję zastosowania jednoczesnego masek apodyzowanych fazowych i amplitudowych. Doktorantka przedstawia tylko wyniki jakościowe jednej symulacji, które wskazują jakościowo na potencjalne korzyści płynące z jednoczesnego zastosowania obu masek. Jednak rozdział nie zawiera żadnej głębszej dyskusji, która analizowałaby ten przypadek pod kątem ilościowych korzyści oraz kosztów związanych ze złożonością układu.

Reasumując, rozdział 4 pomimo pewnych niedociągnięć przedstawia bardzo wartościowe i przekonujące wyniki, które jednoznacznie wskazują na korzyści związane z zastosowaniem masek fazowych i amplitudowych do redukcji powielania obrazów w wyświetlaczach ciekłokrystalicznych oraz ograniczenia tych metod. Rozdział 4 stanowi pełną pozytywną weryfikację tezy rozprawy w zakresie zastosowania masek apodyzowanych.

Rozdział 5 zawiera oryginalne wyniki prac Doktorantki nad ograniczaniem powielania wyświetlanych obrazów poprzez zastosowanie losowości położenia pikseli hologramu w wyświetlaczu ciekłokrystalicznym i stanowi według mojej opinii najciekawszą część rozprawy doktorskiej. Koncepcja powyższej metody polega na zastosowaniu losowości położenia wyświetlanego piksela w modulatorze SLM i poprzez to złamanie regularnej struktury geometrycznej wyświetlacza, które jest odpowiedzialne za powstawanie powielonych obrazów. Doktorantka podzieliła wyświetlacz na superpiksele (superkomórki), z których każdy składa się z macierzy $k \times k$ rzeczywistych pikseli wyświetlacza. Hologram Fourierowski jest wyświetlany na modulatorze SLM w ten sposób, że każdy jego piksel jest pozycjonowany losowo wewnątrz zdefiniowanego superpiksela. Doktorantka rozważa w pracy wpływ wielkości superpiksela w zakresie od rozmiaru 1×1 do 4×4 na jakość generowanych obrazów oraz widoczność obrazów pasożytniczych. Przeprowadzone badania obejmują analizę teoretyczną, symulacje numeryczne rozważanych koncepcji oraz ich weryfikacje eksperymentalne. Przeprowadzone symulacje wykazują, że wraz ze wzrostem rozmiaru



superpiksela, co odpowiada wzrostowi losowości położenia wyświetlanego piksela, widoczność powielanych w wyższych rzędach obrazów spada, natomiast rośnie jednocześnie wartość szumu tła w otoczeniu wyświetlanego obrazu. Rozmiar superpiksela 4×4 jest wystarczający aby powielane obrazy nie były widoczne w otaczającym szumie przy zastosowaniu samej losowości położenia piksela przy utrzymaniu fazy dla wszystkich wyświetlanych pikseli w obrazie niezależnie od losowego przesunięcia. Następnie doktorantka wykazała, że dodatkową poprawę działania metody można osiągnąć poprzez indywidualne dopasowanie fazy wyświetlanych pikseli do fazy danego piksela w rozważanej pozycji dla idealnego hologramu. Do analizy wyników została opracowana dedykowana procedura analizy stosunku sygnału do szumu (SNR) w powielanych obrazach, która umożliwia ilościowe porównanie jakości stosowanej metody losowej w zależności od metody kodowania pikseli oraz wielkości superkomórki. Zgodnie z przewidywaniami przedstawionymi w analizie teoretycznej, stosunek sygnału do szumu spada dla wszystkich obrazów, gdy losowość położenia pikseli wprowadza szum do odtwarzanego obrazu, ale SNR dla głównego obrazu spada znacznie wolniej niż dla powielonych obrazów, które stają się praktycznie nierozróżnialne od tła dla superpiksela o rozmiarze 3×3 przy zastosowaniu zaawansowanej metody kodowania fazy (STN=1,29). Przeprowadzony eksperyment potwierdził wyniki symulacji. Otrzymane wyniki pomiarów SNR są nawet lepsze niż w modelu numerycznym i wykazują, że nawet przy zastosowaniu uproszczonej metody kodowania powielonych obraz stają się praktycznie nierozróżnialne od tła dla superpiksela o rozmiarze 3×3 . Jednocześnie jednak wartość SNR dla obrazu głównego jest dla wszystkich przypadków znacznie niższa niż w symulacji. Analiza rozbieżności pomiędzy wynikami modelowania a eksperymentem jest bardzo skrótowa i być może wystarczająca do publikacji w czasopiśmie naukowym, natomiast nie wyczerpuje tematu w przypadku rozprawy doktorskiej i powinna być pogłębiona.

Ostatnia część rozdziału 5 (podrozdział 5.5) ma charakter raczej koncepcyjny niż dogłębnych badań. W tej części Doktorantka przedstawiła koncepcję zastosowania granatu itrowo-żelazowego domieszkowanego jonami kobaltu jako bezkomórkowego przestrzennego modulatora światła do kodowania hologramów. W rozdziale przedstawiono wyniki eksperymentalne możliwości zapisu i odczytu pikseli w ośrodku dla pojedynczych pikseli oraz



hologramów Fourierskich. Przedstawione badania mają charakter wstępny, a wyniki zapisu przy zastosowaniu różnych współczynników k nie mają wiele wspólnego z losowością przestrzennego pozycjonowania pikseli. Otrzymane wyniki także nie wskazują na ograniczanie powielania wyświetlanego obrazu. Ten rozdział pozbawiony jest głębszej analizy skromnych otrzymanych wyników (przedstawiono tylko pojedynczy wynik - rys. 5.18) i niewiele wnosi do tematyki rozprawy w takiej formie. Dlatego traktuję jego jako bardzo wstępną koncepcję, która w obecnej formie nie wnosi nowej wiedzy w zakresie zastosowania nowych metod do ograniczenia powielania obrazów w wyświetlaczach bezsoczewkowych.

W podsumowaniu całość rozdziału 5 oceniam bardzo dobrze. Doktorantka przedstawiła wartościowe i przekonujące wyniki badań, które jednoznacznie wskazują na korzyści związane z zastosowaniem losowości położenia pikseli do redukcji powielania obrazów w wyświetlaczach ciekłokrystalicznych oraz ograniczenia tych metod. Rozdział 5 stanowi pełną pozytywną weryfikację tezy rozprawy w zakresie zastosowania losowości położenia pikseli.

Ostatni rozdział 6 zawiera krótkie podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych i wykazanie pozytywnej weryfikacji tezy rozprawy doktorskiej. Rozdział niestety nie zawiera analizy wpływu osiągniętych wyników na rozwój wyświetlaczy bezsoczewkowych oraz propozycji kolejnych etapów badań, które mogą stanowić rozwinięcie wyników przedstawionych w rozprawie doktorskiej.

Przedstawioną przez mgr inż. Joanne Starobrat rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Praca zawiera nowe, wartościowe wyniki dotyczące metod ograniczenia powielania obrazów w wyświetlaczach bezsoczewkowych. Doktorantka zaproponowała 3 metody rozwiązania problemu przy zastosowaniu masek apodyzowanych fazowych i amplitudowych oraz losowości położenia pikseli w wyświetlanym hologramie. Prace obejmują analizę teoretyczną, modelowanie numeryczne i weryfikacje eksperymentalne. Wnioski są oparte bardzo rzetelną analizą wyników i wskazaniem zalet i ograniczeń poszczególnych rozwiązań. Pewien niedosyt pozostawia bardzo syntetyczny rozdział 6, w którym brakuje głębszego porównania wyników uzyskanych przy zastosowaniu poszczególnych metod oraz analizy



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

możliwości synergii pomiędzy nimi. Na szczególne uznanie zasługują prace związane z zastosowaniem losowości położenia pikseli w superkomórkach, gdyż ta metoda pomimo obniżenia rozdzielczości wyświetlanych hologramów wydaje się być najbardziej korzystną i prostą do implementacji w rzeczywistych mikrowyświetlaczach bezsoczewkowych.

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 Doktorantkę.

Pewną niedogodność w odbiorze pracy stanowią zbyt małe rysunki m.in. 4.17, 4.27, 4.29, 5.2, 5.5, 5.8 itd. W ocenie wyników pracy przez czytelnika rozprawy kluczową rolę odgrywa możliwość porównania poszczególnych obrazów pomiędzy sobą dla subiektywnej oceny jakości usunięcia powielonych ‘pasożytniczych’ obrazów. Niestety w formacie wydruku są one zbyt małe, aby porównać ich jakość i czytelnik jest zdany wyłącznie na interpretację Doktorantki.

Moją generalną uwagę do pracy stanowi brak odniesienia do wcześniejszych prac związanych ze stosowaniem masek apodyzowanych w holografii. Koncepcja masek apodyzowanych nie jest nowa i podobne maski były wprowadzone i stosowane od lat 70-tych do poprawy jakości odtwarzania hologramów generowanych komputerowo i ograniczania wyższych rzędów dyfrakcyjnych (np. C B Burckhardt, Use of a random phase mask for the recording of fourier transform holograms of data masks, Appl Opt. 1970 Mar 1;9(3):695-700. doi: 10.1364/AO.9.000695, Akaev, A., & Maiorov, S. A. (1975). Method for recording an array of Fourier holograms avoiding mutual interference. Soviet Journal of Quantum Electronics, 5(5), 519–523), patent N. Leister, S. Reichelt, Holographic direct view display having an apodization device US20140198361A1, Chashchin, V. S. Apodization in holographic Fourier spectroscopy, Soviet Physics Technical Physics, vol. 25, July 1980, p. 901, 902). Warto byłoby to podkreślić w takim rodzaju opracowania naukowego, jakim jest



rozprawa doktorska, aby nie powstało mylne wrażenie, że tematyka apodyzacji jest wynikiem odkryć w ciągu ostatnich kilkunastu lat.

Moja druga generalna uwaga dotyczy zbyt skromnego opisu metodologii pomiarowej w zakresie akwizycji obrazów. Nie jest jasne czy obrazy były rejestrowane kamerą pracującą w zakresie liniowym czułości oraz w jaki sposób były liczone wartości natężenia w obrazach, które przedstawione zostały m.in. w tabelach 4.4, 4.5. Liniowość czułości lub odtworzenie liniowej zależności pomiędzy natężeniem a odczytanymi zmierzonymi wartościami jest istotne dla przedstawianych w rozprawie wniosków obnoszących się do wartości sygnału do szumu oraz redukcji widoczności powielanych obrazów w stosunku do obrazu głównego.

Ponadto, opis metody, jaki zastosowała Doktorantka, do określenia optymalnego skoku fazy dla obu przypadków optymalizacji wydajności w pierwszym rzędzie oraz optymalizacji redukcji widzialności obrazów pasożytniczych w wyższych rzędach dla apodyzowanych masek binarnych jest niejasny i zbyt skórowy (str. 64-65, równania 4.12 – 4.17 z opisami). Recenzent pomimo starań nie był w stanie prześledzić toku rozumowania i wyprowadzania wartości skoku fazy 0.65 Pi .

Pozostałe moje krytyczne uwagi zostały zawarte w analizie rozdziałów 4, 5 i 6.

W podsumowaniu, wszystkie krytyczne uwagi dotyczące słabszych elementów przedstawionej pracy nie podważają w żaden sposób mojej wysokiej oceny rozprawy doktorskiej jako całości oraz ważnych i oryginalnych osiągnięć badawczych Doktorantki.

Uzyskane wyniki stanowią ważny element aktualnych badań światowych dotyczących optymalizacji kompaktowych, bezsoczewkowych wyświetlaczy holograficznych opartych na przestrzennych modulatorach światła, które mogą znaleźć zastosowanie w oczekiwanych na rynku od lat systemach rozszerzonej rzeczywistości.

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska oraz dotychczasowy dorobek naukowy mgr inż. Joanny Starobrat 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.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy Pani mgr Joanny Starobrat za opracowanie metody losowego wyświetlania pikseli hologramów Fourierowskich i wykazanie możliwości pełnego usunięcia powielanych obrazów przy zastosowaniu tej metody. Otrzymane wyniki w tym zakresie mają olbrzymie znaczenie dla rozwoju i poprawy jakości holograficznych mikrowyświetlaczy bezsoczewkowych.

Warszawa, 10.11.2023

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński