

Warszawa, 30.08 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Janusz PARKA  
Instytut Fizyki Technicznej  
Wydział Nowych Technologii i Chemii  
Wojskowa Akademia Techniczna  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2  
e-mail: [janusz.parka@wat.edu.pl](mailto:janusz.parka@wat.edu.pl)

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Starobrat

pt. „Reduction of Higher Diffraction Orders in Reconstructions of Sampled Fourier Holograms”

### 1. Wprowadzenie i przedmiot recenzji

Recenzja niniejszej rozprawy doktorskiej została wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy doktorskiej mgr. inż. **Joanny Starobrat** jest prof. dr hab. inż. Andrzej Kołodziejczyk. Praca dotyczy badania i poprawy właściwości przestrzennych ciekłokrystalicznych modulatorów światła.

Wirtualna rzeczywistość oraz sztuczna inteligencja staje się faktem i coraz śmielej wkracza do codziennego życia. Zobrazowania trójwymiarowe w tym holograficzne są coraz bardziej potrzebne w różnych współczesnych rozwiązaniach technicznych. Wysoka efektywność energetyczna jest pożądanym czynnikiem dla rozwijających się technologii holograficznych. Przestrzenne modulatory światła pozwalające na realizację obrazów holograficznych oraz korelatory optyczne są obecnie komercyjnie dostępne i praktycznie używane. Mają one swoje niezaprzeczalne zalety, ale też i wady. Przestrzenne ciekłokrystaliczne modulatory światła od co najmniej kilkudziesięciu lat są nadal „gorącym tematem badawczym”. Chodzi głównie o poprawę ich parametrów elektrooptycznych. Wykorzystywany w modulatorach ciekły kryształ jest z reguły materiałem o relatywnie dużej dwójłomności optycznej i w związku z tym niekorzystne zjawiska dyfrakcyjne, jakie występują w cienkiej warstwie ciekłego kryształu w pewnym sensie zakłócają odwzorowanie obrazu holograficznego generowanego przy użyciu takiego modulatora. Zaburzenia te związane są głównie z wielostopniową modulacją fazy. Struktura pikselowa modulatora przysparza

dotatkowych komplikacji przy dokładnym generowaniu obrazu holograficznego o dużej rozdzielczości. Jest to związane z tym, że występujące wyższe rzędy dyfrakcji niepotrzebnie zaburzające odtwarzany „główny obraz holograficzny”. Występuje związek pomiędzy strukturą pikselową (macierzową), a powieleniami obrazów w rekonstrukcji hologramów Fouriera.

## **2. Zakres pracy i ocena merytoryczna**

Doktorantka w swojej pracy zajęła się głównie zagadnieniami poprawy generowanych za pomocą LCoS jakości odwzorowań holograficznych. Zaproponowała zastosowanie apodyzacyjnych masek amplitudowych, fazowych i amplitudowo-fazowych w celu wygaszenia powieżeń powstałych obrazów, tym samym zwiększając wydajność dyfrakcyjną. Mgr inż. Starobrat zaprojektowała maski o gaussowskim profilu przekroju efektywnego pojedynczego piksela. Pozwalają one na skierowanie wiązki rekonstruującej hologram poza oś projekcji.

Symulacyjnie sprawdzone zostały niektóre warianty takich masek. Symulacyjnie zbadana została także skuteczność i możliwość łączenia apodyzowanych masek fazowych i amplitudowych. Zaproponowana została również procedura randomizacji. Autorka rozważała również możliwość nieregularnie rozłożonych pikseli (randomizacja), co wydaje się jednak trudniejsze w zastosowaniu do komercyjnie wykonanego modulatora. W efekcie końcowym, można by zaproponować jako rozwiązanie alternatywne modulator bezpikselowy, który jednak też ma swoje wady. Doktorantce udało się uzyskać znaczne wygaszenie powieżeń obrazów niestety kosztem zwiększenia szumów.

Ważność tego zagadnienia badawczego jest widoczna w postaci licznych publikacji oraz wielu referatów i posterów, z jakimi się spotykam na wielu międzynarodowych konferencjach dotyczących ciekłych kryształów. Dlatego uważam za niezwykle interesujące i ważne podjęcie przez doktorantkę tematu projektowania i badań związanych z poprawą jakości przestrzennych modulatorów światła.

Badania, które podjęła Doktorantka, mają walor poznawczy jak również mogą stanowić podstawę do rozwiązań praktycznych przy konstruowaniu przetworników typu LCoS i ich sposobu ich zastosowań.

Układ rozprawy jest klasyczny. Rozprawa liczy 115 stron, zawiera 72 często wielopanelowych rysunków, wykresów i fotografii, 10 tabel i cytowanych jest 109 pozycji bibliograficznych. Rozprawa napisana jest poprawnym technicznym językiem angielskim i

podzielona jest na 6 rozdziałów. Ponadto zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis treści.

Praca rozpoczyna się wstępem (rozdz. 1), w którym Doktorantka przekonuje o ważności podjętego zadania, definiując podstawowe pojęcia używane w pracy oraz prezentuje tezę pracy. Teza ta stanowi, że zredukowanie niekorzystnych zjawisk powstałych w LCoS zastosowanych do projekcji hologramów można uzyskać poprzez zmianę struktury przy wykorzystaniu masek fazowych lub fazowo amplitudowych oraz randomizację. W założeniu rozwiązania zaproponowane przez mgr inż. Joannę Starobrat powinny być relatywnie tanie zarówno na etapie wykonania i stosowania. Maski mogłyby stanowić dodatkowy element do komercyjnie wykonanego SLM.

W rozdziale drugim Autorka przedstawia podstawy teoretyczne dotyczące skalarnej teorii dyfrakcji, transformat Fouriera oraz podstaw zapisów i odtwarzania hologramów. Opisuje właściwości LCoS SLM. Na rys. 2.12 i 2.13 przedstawione zostały: warstwa ciekłego kryształu (w domyśle jako element LCoS) i modulacja fazy przy wykorzystaniu tego elementu. Należy podkreślić, że jest to jedynie rysunek poglądowy, ponieważ w komercyjnych LCoS wykorzystywane są inne efekty np. VAN (Vertical Alignment), w których występuje zupełnie inna konfiguracja orientacji ciekłego kryształu, a w związku z tym nieco inaczej przebiega modulacja fazy. Omówiony został również algorytm Gerchleberg-Saxton jako przykład realizacji szybkiej transformaty Fouriera.

W rozdziale trzecim przedstawione zostały źródła powstawania niekorzystnych dodatkowych obrazów powstających w procesie rekonstrukcji hologramów. Omówione są również teoretyczne podstawy rekonstrukcji hologramów przez struktury LCoS. Doktorantka opisała apodyzję piksela LCoS oraz uwarunkowania procedury randomizacji.

Rozdział czwarty, najbardziej obszerny, zawiera wyniki symulacji numerycznych dla pikseli o różnych kształtach. Symulacje rekonstrukcji hologramów prowadzone były z wykorzystaniem programu „LightSword” opracowanego na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Symulacje dotyczyły matryc o różnych odstępach i różnym współczynniku wypełnienia od 88 do 93%. Rozważana był też różna ilość pikseli aż do wymiaru 2048x2048 jak posiada to SLM Pluto firmy HOLOEYE włącznie. W tym przypadku wymiar piksela wynosił 8  $\mu\text{m}$ . Model tego SLM został później wykorzystany do eksperymentalnego sprawdzenia uzyskanych rezultatów symulacji. Wykorzystane zostały maski wykonane zarówno technologią LBL oraz EBL. W rozdziale 4 oraz następnie 5, zdaniem recenzenta, zawarta jest najbardziej istotna część pracy. Doktorantka szczegółowo opisuje wyniki symulacji. Mgr inż. Starobrat zaprojektowała i wykonała maski apodyzacyjne amplitudowe i

fazowe. Okazało się, że przy apodyzacji amplitudowej pozycjonowanie maski względem piksela wykazuje się niewielką czułością, natomiast apodyzacja fazowa nie wpływa na kształt obwiedni sygnału generowanego przez piksel. Rezultaty symulacyjne zostały potwierdzone eksperymentalnie.

W rozdziale piątym Doktorantka rozważa procesy randomizacji i ich wpływ na jakość generowanych przez SLM hologramów. Zagadnienia randomizacji podparte są szeroką analizą teoretyczną. Omówione zostały również problemy związane z kształtem sygnałów generowanych przez matryce pikseli oraz rozkład powstałych szumów. Symulacje numeryczne wskazują, że stosunek sygnału do szumu wyraźnie zależy od stopnia randomizacji. W rozdziale tym wspomniano również o możliwościach nowego materiału (YIG:Co), z wykorzystaniem którego mogłby być wykonywane bezpikselowe SLM.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie uzyskanych rezultatów oraz wnioski. Zdaniem recenzenta w podsumowaniu Doktorantka opisała wiele szczegółowych zależności jakie zaobserwowała dla badanych struktur.

Jeszcze raz należy podkreślić, że praca zawiera starannie dobraną podbudowę teoretyczną dotyczącą tematu, wyniki symulacji oraz dane eksperymentalne weryfikujące rezultaty wynikające z symulacji.

Literatura dotycząca tematu dobrana jest poprawnie, a cytowania najważniejszych prac właściwe. Przedstawiona w sposób rzetelny analiza zagadnień podejmowanych w pracy w oparciu o dane literaturowe świadczy o bardzo dobrym rozpoznaniu tematu i przygotowaniu doktorantki do prowadzenia pracy naukowej oraz realizacji zamierzonych badań. Badane zjawiska są dobrze opisane od strony teoretycznej co świadczy, że mgr inż. Starobrat rozumie podstawy teoretyczne i fizykę badanych zjawisk.

Praca napisana jest w poprawnym, technicznym języku angielskim, a jej redakcja składna i przejrzysta. W tym zakresie uwag nie wnoszę.

### **3. Uwagi ogólne i dyskusyjne**

Uważam, że metody badawcze przyjęte przez Doktorantkę są poprawne a jakość uzyskanych wyników jest wartościowa. Większość z nich została zweryfikowana poprzez umieszczenie ich w publikacjach w czasopismach o relatywnie dużym współczynniku wpływu.

Doktorantce udało się wykazać, że poprzez zmiany struktury pikseli tj. zastosowanie subpikselowych apodyzowanych masek oraz poprzez randomizację pozycji pikseli w modulatorze przestrzennym można uzyskać częściowe wygaszenie zwielokrotnionych obrazów

i tym samym poprawić jakość hologramów Fouriera generowanych za pomocą LCoS. Jak twierdzi Doktorantka, zaproponowane w pracy metody można łączyć, lecz recenzent nie znalazł w pracy wystarczającego dowodu na uzyskane w ten sposób rezultaty poza zastosowaniem masek fazowo amplitudowych. O ile rzeczywista poprawa jakości uzyskanych zobrazowań holograficznych wykazana w pracy wydaje się bezsporna to powstaje pytanie dlaczego producenci LCoS dotychczas takich rozwiązań nie wdrożyli (chyba, że wdrożyli i brak o tym informacji)?

Rozważania symulacyjne pokazują, że metodami zaproponowanymi przez Doktorantkę można poprawić jakość odwzorowywanych hologramów, co pokazują wyniki eksperymentalne przy zachowaniu innych wartości. Zasadnym więc wydaje się być pytanie na ile zaproponowane w pracy rozwiązania poprawy jakości hologramów są uniwersalne, tj. czy mogą być stosowane do różnych LCoS bez względu na to jaki rodzaj efektu ciekłokrystalicznego jest w nim wykorzystany, a więc np. z różną modulacją fazy wykorzystujących smektyczne ciekłe kryształy. Czy jakieś techniczne bądź metodologiczne rozwiązania pozwoliłyby na uzyskanie parametrów uzyskanych eksperymentalnie bardziej zbliżonych do uzyskanych symulacyjnie? W badaniach doświadczalnych przeprowadzonych przez Doktorantkę wykorzystywany był SLM PLUTO firmy HOLOEYE o wymiarze piksela 8 mikrometrów.

Pytanie, czy tendencja polepszenia jakości hologramów metodami zaproponowanymi przez mgr inż. Starobrat byłaby zachowana dla innych modulatorów, z innym rozmiarem piksela, innymi odstępami między pikselami, wykonanymi według innej technologii, itp. Na ile dokładność wykonania masek apodyzacyjnych wpływa na uzyskane rezultaty poprawy jakości hologramów?

Zdaniem recenzenta interpretacja wyników uzyskanych w pracy i wyciąganych na ich podstawie wniosków jest właściwa. Uwag krytycznych w tym zakresie nie mam.

#### **4. Podsumowanie**

Dorobek publikacyjny doktorantki związany z tematem pracy doktorskiej jest w mojej ocenie imponujący. Składa się na niego 14 współautorskich prac opublikowanych w latach 2017-2023 (według bazy Scopus) z czego większość opublikowana została w czasopiśmie z listy JCR z czego 4 w czasopiśmie o relatywnie dużym indeksie wpływu. W dziewięciu pracach Doktorantka jest pierwszym autorem. Indeks Hirscha Doktorantki na dzień 20 sierpnia 2023 według bazy Scopus wynosi 2. Doktorantka prezentowała wyniki swoich prac również na

konferencjach międzynarodowych. Zgodnie z informacją zawartą w pracy Doktorantka brała udział w 2 projektach badawczych, jednym zagranicznym i jednym krajowym.

Uwagi krytyczne recenzenta są minimalne, a ocena końcowa pracy bardzo pozytywna. Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Starobrat, zawiera duży ładunek udokumentowanych nowości naukowych z zakresu doskonalenia działania ciekłokrystalicznych przestrzennych modulatorów światła. Są to badania o znaczeniu poznawczym oraz niewykluczone, że być może również aplikacyjnym. Należy raz jeszcze podkreślić, że Doktorantka podjęła się badań bardzo interesujących zagadnień analizując je zarówno od strony opisu teoretycznego poprzez stymulacje numeryczne oraz eksperyment. Są to, w opinii recenzenta, ważne zagadnienia dla dalszego rozwoju przestrzennych modulatorów światła w zastosowaniach do zobrazowań holograficznych.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pani mgr inż. Joanny Starobrat spełnia warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych. Wnoszę o przyjęcie pracy i dopuszczenie jej Autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Wnoszę również o jej wyróżnienie. Powodem takiego wniosku jest głównie kompleksowa analiza badanych zjawisk (opis teoretyczny, symulacje i badania eksperymentalne) oraz liczący się dorobek publikacyjny. Znaczna część wyników pracy została opublikowana w renomowanych międzynarodowych czasopismach.



Janusz Parka