

Autoreferat

dr inż. Michał Makowski

Zakład Optyki i Fotoniki

Wydział Fizyki

Politechnika Warszawska

Warszawa, 23 stycznia 2014

Spis treści

1. Życiorys	3
2. Osiągnięcie stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego	4
2.1 Określenie osiągnięcia i dane bibliograficzne	4
2.2 Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	5
3. Opis pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych przed uzyskaniem stopnia doktora	13
3.1 Hologramy Fresnela scen przestrzennych	13
3.2. Dyfrakcyjne elementy optyczne obrazujące ze zwiększoną głębią ostrości	14
4. Opis pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych po uzyskaniu stopnia doktora	15
4.1 Quasi-statyczny holograficzny wyświetlacz przezierny typu Head-Up Display	15
4.2 Jedno-ekspozycyjna holografia cyfrowa	15
4.3 Dyfrakcyjne kształtowanie promieniowania terahercowego	16

1. Życiorys

DANE PERSONALNE: Michał MAKOWSKI
Data urodzenia: 27.11.1978r., Warszawa
Adres: ul. Al. Wilanowska 41 m. 34, 02-765 Warszawa
Kontakt: +48 504 008 479, michal.makowski@if.pw.edu.pl
Stan cywilny: żonaty, troje dzieci

ZATRUDNIENIE:

2007 – Adiunkt na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej.

WYKSZTAŁCENIE:

2002 – 2007 Studia doktoranckie na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej, ukończone z wyróżnieniem. Tytuł rozprawy doktorskiej: „Hologramy Fresnela scen przestrzennych uzyskiwane iteracyjnie”, obroniona z oceną celującą. Dyplom doktora nauk fizycznych wg uchwały Rady Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej z dnia 28.06.2007 r.

1997 – 2002 Studia dzienne na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, specjalność: optoelektronika, ukończone z wyróżnieniem. Dyplom magistra inżyniera.

1993 – 1997 II Liceum Ogólnokształcące im. Stefana Batorego w Warszawie, klasa o profilu matematyczno-fizycznym.

STATYSTYKA DOROBKU NAUKOWEGO: (według Web of Science)

Sumaryczny *Impact Factor*: 56,3 (38 publikacji naukowych)

Ilość cytowań obcych: 96

Indeks H = 7

INNE INFORMACJE:

Znajomość języków obcych: j. angielski (płynnie w mowie i piśmie), j. francuski (poziom podstawowy).

Umiejętność obsługi komputera i programowania w C++, VB, C#, .net.

Projektant i programista systemów bazodanowych Microsoft SQL Server.

Prawo jazdy kat. B od 1996 roku.

2. Osiągnięcie stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego

2.1 Określenie osiągnięcia i dane bibliograficzne

Moja podstawowa działalność naukowa po uzyskaniu doktoratu związana jest z dziedziną optyki dyfrakcyjnej i holografii komputerowej, a konkretnie z bezsoczewkową projekcją kolorowych obrazów płaskich.

Jako główne osiągnięcie naukowe wg art. 16 ust. 2. ustawy z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) przedstawiam jedno-tematyczny cykl siedmiu publikacji zatytułowany: "Dyfrakcyjna projekcja dwuwymiarowych, barwnych rozkładów natężenia światła".

Na cykl ten składają się następujące prace opublikowane w latach 2010-2013 w periodykach optycznych z listy JCR (ang. *Journal Citation Report*):

H1. M. Makowski, I. Ducin, M. Sypek, A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, A. Kolodziejczyk, „Color image projection based on Fourier holograms”, *Opt. Lett.* 35, 1227-1229 (2010).

H2. M. Makowski, I. Ducin, K. Kakarenko, A. Kolodziejczyk, A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, M. Sypek, D. Wojnowski, "Efficient image projection by Fourier electroholography," *Opt. Lett.* 36, 3018-3020 (2011).

H3. M. Makowski, A. Siemion, I. Ducin, K. Kakarenko, M. Sypek, A. M. Siemion, J. Suszek, D. Wojnowski, Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, „Complex light modulation for lensless image projection,” *Chin. Opt. Lett.* 9, 12008 (2011).

H4. M. Makowski, I. Ducin, K. Kakarenko, J. Suszek, M. Sypek, A. Kolodziejczyk, "Simple holographic projection in color," *Opt. Express* 20, 25130-25136 (2012).

H5. A. Siemion, M. Sypek, J. Suszek, M. Makowski, A. M. Siemion, A. Kolodziejczyk, and Z. Jaroszewicz, "Diffuserless holographic projection working on twin spatial light modulators," *Opt. Lett.* 37, 5064-5066 (2012).

H6. T. Shimobaba, M. Makowski, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama, and T. Ito, "Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction," *Opt. Express*. 21, 25285-25290 (2013).

H7. M. Makowski, "Minimized speckle noise in lens-less holographic projection by pixel separation," *Opt. Express* 21, 29205-29216 (2013).

Poniższa tabela zawiera wartość bieżącą współczynnika *Impact Factor* oraz skrótowy opis mojego wkładu w powstanie danej publikacji wraz z jego oszacowaniem procentowym.

Praca	IF	Wkład habilitanta	Udział %
H1	3,385	Pomysłodawca, współautor układu optycznego, współwykonawca eksperymentu optycznego, autor tekstu i twórca części ilustracji.	75%
H2	3,385	Pomysłodawca, współautor układu optycznego, współwykonawca eksperymentu optycznego, autor tekstu i twórca ilustracji.	70%
H3	0,968	Pomysłodawca, autor układu optycznego, współwykonawca eksperymentu optycznego, autor tekstu i twórca części ilustracji.	75%
H4	3,546	Pomysłodawca, współautor układu optycznego, współwykonawca eksperymentu optycznego, autor tekstu i twórca ilustracji.	75%
H5	3,385	Współautor koncepcji naukowej i układu optycznego, autor metody justowania układu, współwykonawca eksperymentu optycznego, współautor tekstu.	35%
H6	3,546	Współautor koncepcji naukowej, autor części algorytmu obliczania hologramów fazowych, wykonawca układu optycznego i eksperymentu oraz obróbki danych, twórca części ilustracji.	40%
H7	3,546	Pomysłodawca, wykonawca symulacji i eksperymentu optycznego, autor tekstu i ilustracji.	100%

Precyzyjne określenie mojego wkładu do powyższych publikacji zostało przedstawione w załączniku nr 4.

Oświadczenia pozostałych współautorów powyższych prac zostały zebrane w załączniku nr 6.

2.2 Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Podstawowym problemem naukowym, którego rozwiązanie postawiłem sobie za zadanie, jest wytworzenie w danej płaszczyźnie zadanego rozkładu natężenia światła bez soczewki, za to z wykorzystaniem dyfrakcji na czysto fazowym przestrzennym modulatorze światła (ang. Spatial Light Modulator, SLM). Tak pojęta zdalna projekcja obrazu ma dużą przewagę nad konwencjonalnymi technikami bazującymi na obrazowaniu, polegającą na znacznie większej wydajności energetycznej wynikającej z praktycznie bezstratnego formowania pola natężeniowego. Z tego powodu koncepcja ta jest bardzo obiecująca i wyczekiwana przez przemysł wyświetlaczy, stąd także zrodziło się moje zainteresowanie wykorzystaniem tu holografii komputerowej.

W ogólności rozpatrujemy modelową geometrię, w której wyróżnić można dwie płaszczyzny równoległe do siebie i prostopadłe do ustalonej osi optycznej. Odległość między płaszczyznami równa jest "odległości projekcji". Zakłada się, że w pierwszej płaszczyźnie umieszczono płaski hologram fazowy, oświetlony wiązką monochromatycznego światła laserowego o pewnej krzywiznie frontu falowego (wiązka płaska, sferyczna zbieżna lub rozbieżna). Z kolei drugą płaszczyznę utożsamiamy z ekranem projekcyjnym, na którym następuje akwizycja (fotografowanie) rozkładu natężenia światła. Podstawowym zadaniem i problemem naukowym jest takie dobranie rozkładu fazowego hologramu zaadresowanego na SLM, by w płaszczyźnie ekranu utworzył się zadany rozkład natężenia z jak najmniejszym błędem. Przyjmujemy, że wspomniany błąd posiada trzy czynniki składowe: defekty lokalne obrazu, globalna niejednorodność jasności oraz szum speklowy.

W pierwszym przybliżeniu omawiane zagadnienie wydaje się trywialne, gdyż jedyną konieczną operacją może być numeryczne obliczenie propagacji wstecznej od płaszczyzny ekranu z naniesionym polem świetlnym o żądanym rozkładzie natężenia do płaszczyzny hologramu i ekstrakcja rozkładu fazy tak uzyskanego pola świetlnego. Optymalną metodą obliczania pól dyfrakcyjnych w takiej konfiguracji okazuje się być Zmodyfikowana Metoda Splotowa (ang. Modified Convolution Method) [1], ze względu na szeroki zakres obsługiwanych odległości propagacji oraz możliwość uzyskiwania realistycznych wyników przy propagacji poza-osiowej. Taka jednostopniowa i prosta metoda daje jednak mierne efekty, gdyż obliczone pole świetlne niesie informację o zapisanym obrazie zarówno w składowej fazowej jak i amplitudowej. Ponieważ ze względów sprzętowych zakładamy modulację czysto fazową światła, składowa amplitudowa musi zostać pominięta. To z kolei przekłada się na znaczny wzrost lokalnych zniekształceń obrazu i nierównomierności jego jasności do nie akceptowalnego poziomu.

Częściowym rozwiązaniem jest przeniesienie większości informacji o obiekcie do składowej fazowej pola świetlnego przez nałożenie losowej fazy początkowej w płaszczyźnie ekranu. Tak utworzone pole świetlne przepropagowane wstecz od płaszczyzny ekranu do płaszczyzny hologramu będzie posiadało dość równomierny rozkład amplitudy, a zatem jej pominięcie usunie mniejszą ilość informacji o przedmiocie. Niestety obraz odtworzony z tak uzyskanego hologramu fazowego będzie charakteryzował się znacznym udziałem szumu speklowego.

W trakcie prowadzonych badań udało mi się ustalić, że właściwym rozwiązaniem problemu jest iteracyjne optymalizowanie fazy w zapętłonym procesie numerycznym, np. według algorytmu Gerchberga-Saxtona (G-S) [2]. Algorytm ten polega na iteracyjnym propagowaniu pola świetlnego pomiędzy wyróżnionymi płaszczyznami w pętli, przy czym w każdym obiegu pętli w płaszczyźnie hologramu nadpisujemy bieżącą amplitudę ewoluującego pola amplitudą jednorodną (równą 1) natomiast w płaszczyźnie ekranu wymuszamy rozkład amplitudy docelowego obrazu (zwykle pobierany z pliku komputerowego). W opisanym procesie pole świetlne ewoluuje do stanu, w którym prawie cała informacja przedmiotowa zawarta jest w fazie, natomiast amplituda nie niesie żadnej informacji (tzn. jest w przybliżeniu stała). Według Wyrowskiego [3] najbardziej uniwersalnym podejściem jest losowa faza początkowa pola świetlnego i tak też czyniłem z dobrym skutkiem. Oczywiście jest, że skuteczność algorytmu zależy od ilości wykonanych iteracji, jednakże zwiększanie tej liczby powoduje znaczny wzrost czasu obliczeń, ponieważ każda iteracja wymaga wykonania dwóch operacji szybkiej transformaty Fouriera (ang. Fast Fourier Transform, FFT) oraz operacji liniowych nadpisywania amplitudy bez zmiany stanu fazy. W większości prac opisanych w dalszej części tego rozdziału optymalną ilością iteracji było 3-4 a czas obliczeń na przeciętnym komputerze wynosił kilka sekund przy obliczeniach prowadzonych na procesorze centralnym oraz rzędu kilkadziesiąt milisekund przy obliczeniach na karcie graficznej (ang. Graphics Processing Unit, GPU). Należy wspomnieć, że algorytm Gerchberga-Saxtona należy do dużej i rosnącej rodziny algorytmów iteracyjnych poszukiwania fazy (ang. phase retrieval algorithms). Popularnie stosowanymi innymi technikami jest np. algorytm Simulated Annealing [4], OPPO (Output Plane Phase Optimization) [5] oraz algorytm poszukiwania binarnego (Direct Binary Search) [6]. Wszystkie te algorytmy były przeze mnie rozważane bądź testowane, jednak na podstawie przeglądowych prac Fienupa [7,8] oraz własnych doświadczeń uznałem, że algorytm G-S jest optymalny z następujących względów. Po pierwsze jest on praktycznie zawsze zbieżny (nie ulega stagnacji) i daje dobre rezultaty niezależnie od zawartości obrazu docelowego - to powoduje pełną uniwersalność, czyli brak jakichkolwiek ustawianych a priori parametrów algorytmu. Po drugie daje znaczącą poprawę już po pierwszej

iteracji. Po trzecie jest przeważnie monotoniczny, tj. każda kolejna iteracja przenosi informację przedmiotową do składowej fazowej pola świetlnego, przez co sukcesywnie poprawia się jakość odtworzeń. Dzięki temu przy zbyt małej ilości czasu na przeprowadzenie wielu iteracji również uzyskuje się zadowalające efekty. Po czwarte algorytm ten bazuje na powszechnie używanej metodzie FFT, realizowanej z dużą szybkością i na dużych macierzach obliczeniowych we wszystkich środowiskach programistycznych, włączając w to najnowocześniejsze techniki obliczeń na kartach graficznych (np. nVidia CUDA z biblioteką CUFFT, OpenCL itp.). Ostatni aspekt w obecnych czasach wydaje się być najistotniejszym, ponieważ obliczanie hologramów syntetycznych w czasie rzeczywistym dla dużych macierzy modulatorów (np. Full HD) jest realizowalne wyłącznie w wielopotokowym przetwarzaniu na GPU.

Wspomnianą iteracyjną technikę optymalizacji fazy według algorytmu G-S wykorzystałem w pierwszej pracy eksperymentalnej opisującej barwną projekcję z hologramów Fouriera [H1]. W pracy tej, jak i w kolejnych, rolę hologramu fazowego odgrywał przestrzenny modulator światła firmy Holoeye (model *Pluto VIS*) zbudowany w technologii ciekłego kryształu na podłożu krzemowym (ang. Liquid Crystal on Silicon, LCoS) [9]. Modulator ten jest adresowany z komputera PC poprzez przewód monitorowy DVI i jest w stanie opóźnić fazę światła padającego na konkretny piksel o rozmiarze $8\ \mu\text{m}$ na $8\ \mu\text{m}$ w pełnym zakresie (tj. $0-2\pi$) dla dowolnej długości fali światła z zakresu widzialnego [10]. Opóźnienie fazy odbywa się poprzez elektronicznie kontrolowaną dwójłomność w warstwie ciekłego kryształu, który jest reorientowany przez pole elektryczne przykładane w sekwencjach krótkich, binarnych impulsów o napięciu ok. 2V. W tym przypadku molekuly są ułożone równolegle do powierzchni modulatora, a przyłożone napięcie elektryczne orientuje molekuly ciekłego kryształu tak, że nadal leżą one w jednej płaszczyźnie. Stąd przy spełnieniu warunku równoległości polaryzacji padającej wiązki do kierunku direktora, można osiągnąć czysto fazową modulację (tj. zmianę współczynnika załamania światła w danym pikselu), bez znaczącej zmiany stanu polaryzacji wiązki wychodzącej. Modulator Holoeye Pluto jest widziany przez komputer sterujący jak zwykły monitor, na którym można wyświetlać jasne i ciemne punkty, przy czym krzywą konwertującą konkretny poziom jasności danego piksela na opóźnienie fazowe należy dobrać samodzielnie metodą optymalizacji wieloparametrowej, którą wykonałem samodzielnie. Należy przy tym pamiętać, że sposób sterowania modułem SLM (a więc treści wyświetlane na nim) ściśle zależą od długości fali padającej wiązki. Z tego powodu musiałem z początku ustalić optymalne poziomy modulacji (poziom dolny i górny) oraz krzywe gamma dla używanych długości fali, tj.: 671nm, 632nm, 532nm, 488nm oraz 445nm. Dodatkowo musiałem zadbać o prawidłową orientację polaryzacji padających wiązek przy użyciu półfalówek. Z niewielkim błędem można powiedzieć, że rozkłady fazowe wyświetlane na SLM są fazową transformatą Fouriera obrazów rekonstruowanych na ekranie projekcyjnym. Błąd ten zależy w dużym stopniu od poznania i skompensowania niedoskonałości danego egzemplarza modulatora, tj. krzywizny podłoża krzemowego oraz czasowych fluktuacji orientacji ciekłego kryształu. Z mojej inicjatywy i pod moim kierunkiem przebadano te dwa zjawiska [11], czego efektem było powiększenie wydajności dyfrakcyjnej urządzenia. W szczególności zmierzono przy użyciu oscyloskopu i zestawu fotodiod oscylacje direktora ciekłego kryształu wokół położenia zadanego przez oprogramowanie. Efekt ten jest negatywną konsekwencją stosowania sterowania impulsowego polem elektrycznym przyłożonym do elektrod w obrębie danego piksela. Odkryłem, że przy domyślnych ustawieniach oprogramowania kontrolera SLM, modulator osiąga optymalną (wyższą niż średnią) wydajność w krótkich chwilach czasu występujących z częstotliwością dwukrotnie większą, niż częstotliwość wyświetlania obrazu, tj. 120 Hz. Synchronizując oświetlenie SLM (lub akwizycję pól

dyfrakcyjnych) z tymi momentami osiągnąłem wydatne zmniejszenie natężenia światła nieugiętego (tj. zerowego rzędu dyfrakcji). To z kolei przełożyło się na wyższy kontrast obrazów wyświetlanych przez SLM w polu dalekim.

W pierwszym eksperymencie [H1] oświetliłem SLM wiązkami zbieżnymi, co sprawiło, że w miejscu przewężenia wiązek (w ognisku) wytworzyło się pole tożsame z transformatą zawartości wyświetlonej na SLM, czyli obrazy zakodowane we wcześniej obliczonych hologramach Fouriera. Moim oryginalnym pomysłem było także podzielenie modulatora SLM na trzy części oraz pokrycie ich filtrami barwnymi dedykowanymi do długości fali trzech wiązek laserowych o kolorach podstawowych: czerwonym, zielonym i niebieskim. To umożliwiło tworzenie obrazu barwnego na ekranie projekcyjnym z każdej klatki wyświetlonej na SLM (tzn. bez podziału czasowego kolorów składowych). Dzięki temu osiągnąłem prędkość wyświetlania animacji równą 60 kl/s i bardzo stabilny, nie migoczący obraz bez tzw. efektu tęczy (tzn. rozpadu kolorów przy szybko poruszających się w obrębie ekranu projekcyjnego obiektach, ang. color break-up). Udało mi się wykazać, że zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi i symulacjami komputerowymi rozdzielczość uzyskanych obrazów (tj. ilość wyświetlonych punktów obrazu) odpowiadała ilości pikseli SLM przypadającej na jeden kolor. Jest to ważny wniosek wskazujący na fakt, że o jakości projekcji decyduje głównie liczba wykorzystywanych pikseli a nie ich rozmiary. Dzięki dużej ilości pikseli modulatora (Full HD, tj. 1920 na 1080 pikseli) udało mi się uzyskać obrazy barwne o zadowalającej rozdzielczości około 1/3 Full HD z błędem pozycjonowania składowych barwnych poniżej 1 piksela. Przy okazji udowodniłem niezwykle istotną cechę aplikacyjną tej techniki projekcji: mianowicie precyzyjne pozycjonowanie składowych barwnych, dobór ogniskowej (odległości projekcji) odbywają się bezstratnie i w pełni elektronicznie (tj. bez części ruchomych) poprzez nakładanie na hologramy na SLM odpowiednich fazowych funkcji korygujących. Ta cecha umożliwia też zestawianie układów projekcyjnych z niskim reżimem dokładności pozycjonowania źródeł światła (tj. z dużymi tolerancjami montażu). Ponadto udało mi się wykazać kolejną ważną zaletę projekcji holograficznej, czyli brak wydzielonych pikseli w obrazie. Dzięki tej właściwości uzyskuje się gładki obraz pozbawiony regularnej siatki rozgraniczającej piksele, będącej dużą wadą tradycyjnej projekcji. Wykorzystane trzy wiązki zbieżne umożliwiły eliminację wtórnych soczewek, zwykle dokonujących odwrotnej transformaty Fouriera i przełożyło się na prostotę układu optycznego. Osiągnąłem wysokiej jakości, kontrastowe, barwne rekonstrukcje holograficzne na ekranie projekcyjnym. Z drugiej strony zbieżny charakter wiązek oświetlających powodował uwypuklenie plamki zerowego rzędu, czyli jasnego punktu na ekranie projekcyjnym, pochodzącego od światła, które nie uległo modulacji fazowej na modulatorze SLM. Ten zerowy rząd ugięcia niesie kilkanaście procent energii, tym niemniej skupiony w plamce o małej powierzchni staje się bardzo widoczny. Dlatego we wspomnianej pracy użyto hologramów typu off-axis (pozaosiowych), dzięki czemu położenie plamki zerowego rzędu zostało efektywnie przesunięte poza obszar obrazu użytecznego.

Całkowite usunięcie plamki zerowego rzędu z ekranu projekcyjnego było z kolei przedmiotem kolejnego eksperymentu [H2]. Dokonałem tego poprzez nałożenie na rozkłady fazowe hologramów Fouriera wyświetlonych na SLM dodatkowych czynników fazowych równoważnych soczewce rozpraszającej o niewielkiej mocy optycznej. Dzięki temu obrazy odtwarzane z hologramów powstawały na ekranie odsuniętym o odległość około 1 m od płaszczyzny fourierowskiej wytworzonej w torze optycznym w przewężeniu zastosowanych wiązek zbieżnych. Przy użyciu amplitudowego filtra górnoprzepustowego uzyskanego fotograficznie zastąpiłem plamkę zerowego rzędu ugięcia tak, by pole dyfrakcyjne z nią związane nie docierało do ekranu projekcyjnego. Przy okazji odtwarzany

obraz nie był zaburzany, gdyż wszystkie częstotliwości przestrzenne oprócz zerowej były w pełni przepuszczane. Dzięki temu zabiegowi uzyskałem statyczne oraz ruchome (animowane) obrazy na ekranie projekcyjnym, prawie nie noszące śladu pola zerowego rzędu dyfrakcji [H2]. Oczywiście odbyło się to kosztem skomplikowania i powiększenia układu optycznego. Jednocześnie zaobserwowałem i zmierzyłem wpływ techniki czasowej integracji szumu speklowego na jakość rekonstrukcji holograficznych, fotografowanych przy przedłużonym czasie ekspozycji. Technika ta zakłada sekwencyjne wyświetlanie na SLM wielu sub-hologramów odtwarzających ten sam rozkład natężenia lecz odpowiadających różnym fazom początkowym w algorytmie Gerchberga-Saxtona. Odtworzenia z takich sub-hologramów wykazują się tym samym sygnałem, ale całkowicie różnym rozkładem szumu speklowego. Dlatego dzięki wyświetlaniu na SLM serii takich sub-hologramów i akwizycji pola natężeniowego na ekranie projekcyjnym przy długim czasie ekspozycji dokonuje się uśrednienia czasowego szumu. Owocuje to znacznie poprawioną jakością obrazów. Wykazałem jednak, że nawet przy dużych liczbach integrowanych sub-hologramów (powyżej 100) nie da się skutecznie wyeliminować szumu speklowego do poziomu akceptowalnego przez przemysł wyświetlaczy, przy czym za próg akceptowalności kontrastu spekli przyjmuje się 5% w zastosowaniach mniej wymagających oraz 1% w zastosowaniach profesjonalnych. Poziom szumu speklowego liczony jest uznaną metodą jako iloraz odchylenia standardowego natężenia w obszarze o jednolitej jasności do średniego natężenia w tym samym obszarze [12]. Drugą techniką zmniejszania zaszumienia, którą zastosowałem w opisanym eksperymencie były mikro-ruchy ekranu projekcyjnego powodujące uśrednienie składnika szumu powstającego w wyniku odbicia koherentnego światła laserowego od chropowatej powierzchni.

Na podstawie powyższych wniosków o niemożności całkowitej eliminacji szumu speklowego rozpocząłem równoległe badania nad całkowitym usunięciem go w wyniku zapręgnięcia do tworzenia obrazów jednoczesnej modulacji amplitudy i fazy światła. Na dzień dzisiejszy nie są dostępne modulatory przestrzenne umożliwiające jednoczesne zmiany zarówno natężenia jak i fazy światła na macierzy gęstych pikseli (choć według moich informacji powinny pojawić się w niedalekiej przyszłości). Postanowiłem zatem skonstruować układ realizujący zespoloną modulację przy użyciu dwóch bliźniaczych modulatorów fazowych SLM, z których jeden był obrazowany na drugim przy użyciu pary soczewek [H3], bądź przez propagację w przestrzeni swobodnej z kompensacją powstałego w wyniku tego opóźnienia fazowego [H5]. W pierwszym przypadku prace realizowane były w ramach projektu *Iuventus Plus* (nr IP2010 023570), którego byłem kierownikiem. Prace rozpoczęły się od obliczenia amplitudowo-fazowego hologramu Fresnela w wyniku wstecznej propagacji amplitudowego pola o rozkładzie natężenia tożsamym z zawartością docelowego obrazu od płaszczyzny ekranu do płaszczyzny modulatora. W wymyślonym przeze mnie układzie optycznym wykorzystałem pierwszy SLM do wyświetlenia na powierzchni drugiego SLM rozkładu amplitudy wspomnianego wyżej hologramu. W ten sposób wykonana została modulacja amplitudowa. Do tego drugi SLM dokładał przesunięcie fazy, skorelowane i spozycjonowane z modulacją amplitudy. Przesunięcie fazy było równe rozkładowi fazy obliczonego uprzednio hologramu, z tym że należało wprowadzić funkcję korekcji, znoszącą niepożądane przesunięcia fazy powstałe przez obrazowanie SLM nr 1 na SLM nr 2 (przeprowadzone z użyciem soczewki lub poprzez propagację w przestrzeni swobodnej). Funkcja ta została dobrana na podstawie pomiarów interferometrycznych oraz licznych symulacji numerycznych. Dzięki żmudnemu justowaniu układu udało mi się uzyskać w centralnej części wiązki kontrolowaną modulację zespoloną pola świetlnego. Dzięki temu uzyskano zadowalający spadek widoczności spekli oraz wzrost kontrastu obrazów na ekranie projekcyjnym.

Wymagane jednakże było niezwykle precyzyjne pozycjonowanie modulatorów względem siebie, a niszczący efekt miały m.in. wewnętrzne krzywizny modulatorów SLM, które powodowały nieznane i trudne do skompensowania przesunięcia fazowe w peryferyjnych obszarach wiązki. Dodatkową trudność stanowiło precyzyjne justowanie układów w modzie projekcji kolorowej. Wymagająca precyzja justowania sprawia, że opisywana technika ma nikłe szanse zastosowań praktycznych, tym niemniej algorytmy i metody wypracowane w toku badań pozwolą na sprawne zaadaptowanie przyszłych modulatorów amplitudowo-fazowych do celów projekcyjnych.

Powyższe trudności sprawiły, że skupiłem się na stworzeniu bardzo prostego i miniaturyzowalnego układu projekcji barwnej, który łączyłby zalety wszystkich stworzonych do tej pory. Zdecydowałem, że celem będzie zaproponowanie układu, który poświęca w niewielkim stopniu jakość projekcji (kontrast, zaszumienie) na rzecz prostoty i niewielkiej ilości komponentów o niskich cenach [H4]. Tym samym idealnym rynkiem docelowym stał się segment piko-projektorów, czyli ultra-kompaktowych urządzeń mobilnych zasilanych bateryjnie. W toku rozmów z przedstawicielami przemysłu (Epson, Citizen, Barco, Samsung) na konferencjach i targach elektroniki użytkowej okazało się, że użytkownicy projektorów wbudowanych w urządzenia mobilne nagminnie korzystają z doraźnie zaadaptowanych ekranów (ściany, kartki papieru itp.), których chropowatość wprowadza pewne nieodżwonne zaszumienie obrazu. Z tego powodu niewielkie dodatkowe zaszumienie będące wadą proponowanej techniki holograficznej nie będzie stanowiło problemu, natomiast doskonała miniaturyzowalność będzie zdecydowanie silnym punktem. Ze względu na wymóg ekstremalnie wysokiej wydajności energetycznej (zakłada się pobór mocy z baterii poniżej 1W) zdecydowałem się na użycie diod laserowych emitujących wiązki rozbieżne, które oświetlają modulator SLM bezpośrednio bądź za pośrednictwem trzech światłowodów przenoszących wiązki w kolorach podstawowych. Światło padające na SLM jest spolaryzowane liniowo w kierunku optymalnym dla wydajnej modulacji fazowej, a światło odbite trafia bezpośrednio na ekran projekcyjny. Dzięki temu układ optyczny składa się jedynie z 5 elementów (3 lasery wprzęgnięte w światłowody, modulator SLM i filtr barwny). Problem zerowego rzędu ugięcia został rozwiązany w ten sposób, że pole świetlne z nim związane nie jest absorbowane ani ukrywane, ale pada na dużą powierzchnię ekranu oraz obszar dookoła ekranu, przez co posiada znikome natężenie i jest praktycznie niezauważalne. Z kolei obraz dyfrakcyjny, formowany w pierwszym rzędzie ugięcia jest skupiony na mniejszym obszarze, przez co znacznie dominuje jasnością. W omówionym układzie uzyskałem barwne projekcje o zmierzonym kontraście ok. 7:1, przy czym wartość ta rośnie wraz z odległością projekcji. Należy dodać, że zastosowanie nowej generacji modulatorów o wyższym współczynniku wypełnienia pikseli (ang. Fill Factor) powyżej 93% (wobec obecnego 87%) umożliwi znaczący wzrost kontrastu poprzez spadek udziału pola zerowego rzędu ugięcia. Szum w uzyskanych obrazach wynika z dwóch mechanizmów. Po pierwsze, w wyniku odbicia światła laserowego od chropowatej powierzchni ekranu projekcyjnego powstają spekle, które w moim przypadku były uśredniane przez mikro-ruchy ekranu. Docelowo planuję zastosowanie nowej generacji diod laserowych ze specjalnie poszerzoną (poprzez modulację elektroniczną) linią emisji - dających wiązki o zmniejszonej koherencji i o niezwykle małym zaszumieniu (np. Sora, Nichia). Drugim mechanizmem powstawania szumu jest konsekwencja stosowania losowej fazy początkowej w algorytmie Gerchberga-Saxtona [13]. Metodą na uśrednienie tego szumu jest szybkie sekwencyjne wyświetlanie na SLM hologramów tego samego obiektu, ale obliczonych z inną losową fazą początkową. To w połączeniu z odpowiednio długim czasem integracji umożliwia spadek kontrastu speklejki równy pierwiastkowi z ilości zintegrowanych klatek. Współdziałanie obu mechanizmów przetestowałem z powodzeniem w eksperymencie [H4].

Największym ograniczeniem proponowanego rozwiązania jest niewielki kąt projekcji determinowany przez odległość między sąsiednimi pikselami modulatora SLM (ang. pixel pitch). Przy obecnie używanym modulatorze z upakowaniem pikseli co $8\ \mu\text{m}$, kąt ten wynosi tylko $4,8^\circ$, co odpowiada przekątnej obrazu ok. 11 cm w odległości 1 m od projektora. Wielkość ta znacznie wzrośnie wraz z zastosowaniem nowych modulatorów o upakowaniu pikseli równym $2,79\ \mu\text{m}$, co dla długości fali $\lambda=671\ \text{nm}$ da kąt projekcji równy 14° . To z kolei odpowiada rozmiarowi obrazu 34 cm w odległości projekcji równej 1 m, a więc zgodnie z zaleceniami dyktowanymi przez badania rynkowe, które mówią iż optymalny rozmiar obraz z projektora powinien być ok. 3 razy większy niż ekrany LCD/OLED wbudowane w telefony komórkowe. Poza tym przesadnie duży kąt projekcji oznacza mniejszą jasność obrazu, co w połączeniu z ograniczeniem poboru mocy do 1W spowoduje, iż z projektora nie da się skorzystać przy dziennym świetle.

Przy okazji warto podkreślić, że proponowane rozwiązanie charakteryzuje się niezwykle dużą wydajnością energetyczną, która przełoży się na długi czas pracy bateryjnej. Głównym tego powodem jest użycie bezstratnej techniki formowania obrazu opartej na przekierowaniu światła w żądane miejsca na ekranie, a nie na selektywnej jego absorpcji i zamiany w ciepło. W teorii wszystkie fotony, które opuszczają źródło światła powinny uformować obraz na ekranie projekcyjnym a wszelkie odstępstwa od tego idealnego przypadku związane są jedynie z niedoskonałością modulatora SLM. Drugim czynnikiem wpływającym na wydajność energetyczną jest użycie wysoko wydajnych (i tanich) źródeł światła, czyli diod laserowych emitujących światło spolaryzowane liniowo, co eliminuje potrzebę stosowania stratnych polaryzatorów. Wymienione względy energetyczne, możliwość znacznej miniaturyzacji oraz niezwykła odporność procesu projekcji na wszelkie zabrudzenia i lokalne defekty SLM sprawiają, że zainteresowanie potencjalnymi aplikacjami opracowanych przeze mnie rozwiązań jest duże. Potwierdza to fakt, że artykuł [H4] stał się jedną z najczęściej ściąganych publikacji w październiku, listopadzie i grudniu 2012 w *Optics Express* (do 450 pobrań miesięcznie). Ponadto chęć współpracy w moich dalszych badaniach zgłosiły: firma Barco - wiodący producent projektorów użytkowych kinowych oraz firma Samsung Electronics Polska.

Najnowsze rezultaty bazujące na tej metodzie opublikowałem na zaproszenie periodyka *SPIE Newsroom* [14].

W 2011 roku, po wygłoszeniu serii zaproszonych wykładów w Japonii, nawiązałem współpracę z grupą prof. Tomoyoshi Shimobaby z Chiba University koło Tokio. Grupa ta od ponad 10 lat z powodzeniem prowadzi badania naukowe nad holografia syntetyczną oraz cyfrową, wyświetlaczami 3D, projekcją holograficzną oraz obliczaniem hologramów w czasie rzeczywistym w sprzętowej technologii FPGA (ang. Field-Programmable Gate Array) oraz CUDA (ang. Compute Unified Device Architecture). W wyniku rozmów podczas dwóch pobytów w Japonii opracowaliśmy plan długofalowej współpracy na polu projekcji bez-soczewkowej. Jej pierwszym owocem było przeprowadzenie przeze mnie eksperymentalnych projekcji monochromatycznych w rozbieżnej wiązce oświetlającej z rozkładów fazowych obliczonych w Japonii, zawierających hologramy Fouriera realizujące funkcjonalność zmiennej długości ogniskowej projektora (funkcja zoom) na bazie teorii skalowanej dyfrakcji Fresnela. To podejście umożliwia dynamiczną zmianę stałej próbkowania pola w płaszczyźnie obrazu i hologramu, co eliminuje efekt *aliasingu*, czyli nakładania się na siebie pól z kolejnych rzędów dyfrakcji podczas powiększania obrazu na ekranie projekcyjnym. Mój eksperyment zapewniał wysoką jakość wyników ze względu na eliminację zbędnych elementów, takich jak ekran dyfuzyjny, polaryzatory, filtry itp. Oprócz tego układ optyczny skonstruowałem w ten sposób, by

możliwe było zdjęcie rezultatów projekcji w kilku odległościach od modulatora SLM. Rezultaty doskonale pokryły się z przewidywaniami z symulacji numerycznych, przeprowadzonych przez prof. Shimobabę. Wyniki zostały spisane we wspólnym artykule [H6], który spotkał się z dużym zainteresowaniem szerokiej publiczności w Japonii dzięki przedrukowi wykonanych przeze mnie ilustracji i zdjęć w magazynie popularno-naukowym *NIKKAN-KOGYO*. Artykuł [H6] stał się też jedną z najczęściej ściąganých publikacji w październiku i listopadzie 2013 w *Optics Express*. Kolejnym zaplanowanym krokiem współpracy z japońskim zespołem będzie uzyskanie projekcji barwnej z funkcją zoom.

Najnowszą zaproponowaną przeze mnie modyfikacją algorytmu projekcji holograficznej w rozbieżnych wiązkiach oświetlających jest wdrożenie techniki separacji punktów obrazu na ekranie projekcyjnym, przez co unika się niekontrolowanych interferencji pomiędzy promieniami światła tworzącymi sąsiadujące ze sobą "piksele". Pomysł był inspirowany podobną realizacją wykonaną przez grupę Takaki [15], przy czym mój algorytm jest wydajniejszy energetycznie i zapewnia wyższą rozdzielczość obrazowania. W przypadku mojego eksperymentu wyniosła ona ponad 500 par linii obrazu w pionie, co oznacza rozdzielczość Full HD [H7]. Zaproponowana technika w istocie jest odmianą tzw. *interleaving'u*, czyli świadomego tworzenia obrazu z odstępami, dzięki którym punkty obrazu, między którymi mogłaby zajść niekorzystna interferencja, są formowane w innych chwilach czasu. Dzięki zastosowaniu tej techniki uzyskałem jakość obrazu w pełni akceptowalną do zastosowań praktycznych (tzn. poziom szumu poniżej 3%). Metoda separacji punktów obrazu likwiduje część szumu speklowego gdyż uniemożliwia wyświetlenie w danej chwili czasu punktów obrazu zbliżonych do siebie poniżej pewnej progowej odległości, związanej z szerokością obwiedni każdego rysowanego na ekranie punktu (według funkcji sinc^2), wynikającej ze skończonego rozmiaru apertury efektywnej modulatora SLM. Jedynym parametrem stworzonego przeze mnie algorytmu obliczania sub-hologramów jest wielkość separacji pikseli w obrazie wejściowym (N), wyrażona w pikselach. Przykładowo dla $N=1$ jako pole amplitudowe do iteracyjnego algorytmu G-S trafia bitmapa wejściowa nie poddana separacji. Dla $N=2$ do algorytmu G-S trafia bitmapa, w której co drugi piksel w kierunku pionowym i poziomym został zaczerpiony, zaczynając od pierwszego o współrzędnych $(0,0)$. Oczywiście wyświetlenie tak obliczonego hologramu na SLM spowoduje odtworzenie na ekranie projekcyjnym obrazu fragmentarycznego, dlatego natychmiast wyświetla się kolejny sub-hologram, w którym zaczerpiony został co drugi piksel, ale zaczynając od tego o współrzędnych $(1,0)$. Następnie obliczenia powtarzają się dla piksela początkowego $(0,1)$ i $(1,1)$. W ogólności powstaje N^2 tak zdefiniowanych sub-hologramów. Wyświetlenie na ekranie odtworzeń z tych wszystkich sub-hologramów jedno po drugim powoduje wrażenie obrazu o znacznie zmniejszonym zaszumieniu. Zwiększanie wartości N powoduje poprawę obrazu przez spadek poziomu szumu, ale zwiększa czas potrzebny na wyświetlenie pełnego obrazu. Dla $N=2$ są to 4 sub-hologramy, więc przy fizycznej prędkości działania SLM rzędu 60Hz możliwe jest wyświetlanie pełnej animacji z szybkością tylko 15 kl/s. Najnowsze dostępne SLM posiadają dużo większe szybkości przełączania rzędu 480 Hz, co umożliwi wyświetlanie animacji w tempie 30 kl/s przy $N=4$, czyli 16 sub-hologramów będzie przypadają na pełną klatkę animacji. W tym ostatnim przypadku poziom szumu według symulacji zamieszczonych w [H7] powinien wynieść tylko 5%. Dzięki metodzie separacji pikseli jedynym składnikiem szumu pozostałym w obrazie na ekranie projekcyjnym jest efekt interferencji pola świetlnego formującego obraz w pierwszym rzędzie dyfrakcji z polem zerowego rzędu ugięcia. Ten mniej istotny składnik szumu powinien dodatkowo znacząco osłabnąć po zamianie SLM na model o wyższym współczynniku wypełnienia.

W 2013 roku zostałem laureatem IV edycji programu *Lider* Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Dzięki temu będę prowadził przez 3 lata projekt zakładający stworzenie młodego zespołu, którego celem będzie dalsze udoskonalanie i miniaturyzacja układu optycznego realizującego barwną holograficzną projekcję obrazów. Realizacja projektu zbiegnie się z dostępnością nowej generacji modulatorów SLM o rozmiarze piksela $3,47\ \mu\text{m}$ lub $2,79\ \mu\text{m}$, co umożliwi znaczącą poprawę parametrów projekcji pól natężeniowych (w szczególności kąta projekcji i ograniczenia pola zerowego rzędu dyfrakcji). W moim mniemaniu pozwoli to na przekucie badań naukowych w aplikacje przemysłowe, co potwierdzają wstępne rozmowy z koncernami: Samsung, Barco oraz zainteresowanie wyrażone przez firmy Epson, Citizen. Dodatkowo w trakcie prac w projekcie wykorzystane zostaną najnowsze możliwości fabrykacji przezroczystych elementów optycznych metodami druku 3D. Wstępnie wykonane symulacje numeryczne potwierdziły, że w naszym zasięgu jest dwukrotne zwiększenie wydajności energetycznej aktualnie sprzedawanych rozwiązań oraz dwukrotne zmniejszenie objętości głowicy projekcyjnej. Moim marzeniem jest, by stworzony na potrzeby projektu zespół naukowy stał się zrzębem nowej pracowni o liczącej się w świecie pozycji w dziedzinie elektro-holografii.

3. Opis pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych przed uzyskaniem stopnia doktora

3.1 Hologramy Fresnela scen przestrzennych

W okresie przed uzyskaniem doktoratu zajmowałem się zagadnieniem iteracyjnego optymalizowania rozkładów fazowych naświetlanych hologramów Fresnela celem uzyskania wysokiej jakości rekonstrukcji obiektów 3D. Jako obiekt 3D rozumiem tu scenę przestrzenną składającą się ze zbioru dyskretnych płaszczyzn przedmiotowych. Celem i jednocześnie funkcją oceny jakości było wyrównane natężenie i niewielki błąd odtworzenia poszczególnych płaszczyzn zapisanych w hologramie. Zaproponowałem oryginalny algorytm iteracyjny, będący rozwinięciem algorytmu Ping-Pong [16] i zakładający pętle naprzemiennych propagacji światła pomiędzy poszczególnymi płaszczyznami obiektu, z odpowiednimi współczynnikami wagowymi, w procesie numerycznym mającym wyłonić finalny rozkład fazy [17,18]. Obliczony rozkład następnie posłużył jako wzór do naświetlenia struktury binarnej techniką elektronolitografii EBL (ang. Electron-Beam Lithography). Naświetlono płytkę pokrytą fotorezystem, która po wywołaniu została oświetlona wycinkiem fali płaskiej uformowanej z wiązki lasera helowo-neonowego. Eksperyment wykazał znaczną poprawę jakości rekonstrukcji we wszystkich trzech założonych płaszczyznach, w porównaniu do hologramu nie optymalizowanego proponowaną techniką. Udokumentowałem zbieżność stworzonego algorytmu oraz jego ograniczenia, np. wynikające z efektu cienia przy zbyt bliskiej odległości między płaszczyznami obiektu 3D. Opis prowadzonych badań, tzn. symulacji numerycznych, eksperymentu i analizy wyników stanowił trzon mojej rozprawy doktorskiej pt. "Hologramy Fresnela scen przestrzennych uzyskiwane iteracyjnie". Potencjalnym zastosowaniem hologramów wytworzonych zaproponowaną metodą mogą być specjalistyczne techniki pułapkowania optycznego oraz spawania i cięcia materiałów według zadanych kształtów plamki światła laserowego definiowanej w trzech wymiarach, a także do trójwymiarowej litografii [19]. Kolejnym zastosowaniem może być stworzenie quasi-achromatycznych hologramów [20], co zostało rozwinięte przez grupę prof. Tomoyoshi Shimobaby [21].

3.2. Dyfrakcyjne elementy optyczne obrazujące ze zwiększoną głębią ostrości

W okresie przed uzyskaniem stopnia doktora zajmowałem się również problemem bezstratnego powiększania głębi ostrości obrazowania przy użyciu dyfrakcyjnych elementów optycznych. Zagadnienie to jest badane od dawna, ale dopiero optyka dyfrakcyjna wydaje się tu być optymalnym rozwiązaniem ze względu na pełną dowolność kształtowania frontów falowych oraz łatwość numerycznego symulowania i fizycznego wykonywania struktur. W wyniku prac, w które byłem zaangażowany [22, 23, 24, 25] określono transmitancję oraz wykonano serię elementów typu *Miecz Świetlny* (ang. *Light Sword*), oferującego znaczne powiększenie głębi ostrości (np. w zakresie odległości przedmiotowej od 25 cm do nieskończoności) ze względu na to, że każdy infimezmalnie cienki sektor tego elementu posiada nieco inną moc optyczną. Sektory w połączeniu w cały element działają kolektywnie jak soczewka jednocześnie skupiająca w pewnym ściśle określonym zakresie mocy optycznych. Istotną cechą tego elementu w porównaniu np. z techniką apodyzacji jest duża przezroczystość elementu, przez co nie zmniejsza się ilość światła docierająca do detektora oraz możliwe jest działanie w trudnych warunkach oświetleniowych, np. w nocy. Element typu *Light Sword* został wykonany w postaci soczewki refrakcyjnej, po czym ustalono, że nie wykazuje on znaczących aberracji chromatycznych, co predestynuje go do zastosowania m.in. w korygowaniu starczowzroczności u ludzi i w widzeniu maszynowym. Element taki mógłby być użyty jako soczewka kontaktowa bądź implant wewnątrzgałkowy. Z kolei ze strony kamer stosowanych w widzeniu maszynowym głębia ostrości ma duże znaczenie, szczególnie w przypadkach słabego oświetlenia uniemożliwiającego zwiększenie głębi ostrości poprzez regulację liczby przesłony. W porównaniu np. z techniką Wavefront Coding opracowaną przez Dowskiego [26], proponowany element wymaga mniej skomplikowanego przetwarzania końcowego, lub nie wymaga go wcale przy zastosowaniu w korygowaniu starczowzroczności, gdzie modulacja mocy optycznej jest stosunkowo niewielka. Należy podkreślić, że konsekwencją tych prac było przyznanie naszemu zespołowi (w konsorcjum z podmiotami zewnętrznymi) dwóch grantów: technologicznego nastawionego na produkcję asymetrycznych osiowo elementów optycznych oraz badawczego, nastawionego na zamodelowanie i przygotowanie do przyszłej produkcji implantu wewnątrzgałkowego opartego na elemencie typu *Light Sword* (europejski program o akronimie *LightSwords* w ramach 7. Programu Ramowego FP7 oraz Program Badań Stosowanych NCBIIR).

Moim pomysłem wykorzystania dodatkowych możliwości oferowanych przez element typu *Light Sword* były pomiary odległości obiektów znajdujących się w polu widzenia kamery [27]. Nowością w stosunku do alternatywnych technik był brak części ruchomych, drugiej kamery, specjalnego obiektywu oraz specjalnych sensorów np. mierzących czas powrotu impulsu światła bądź fali akustycznej. Idea polegała na wykorzystaniu asymetrii kształtu funkcji odpowiedzi impulsowej struktury *Light Sword*, a w szczególności jej obracanie się w funkcji odległości od struktury do punktowego źródła światła. Dzięki tej własności, zdjęcia statyczne wykonane obiektywem z zainstalowaną soczewką *Light Sword* niosą zakodowaną informację o odległości do poszczególnych widocznych na zdjęciu obiektów przez to, że każdy obiekt jest delikatnie rozmyty w innym kierunku. Analizując zdjęcie metodą tzw. ślepego odsplatania (ang. blind deconvolution) [28] z zestawem znanych funkcji PSF można obserwować elementy zdjęcia, których kontrast raptownie wzrósł po odsplenieniu konkretnej funkcji PSF. W ten sposób można z pewnym błędem odczytać położenie obiektów w trzech wymiarach. Błąd pomiaru niestety mocno zależy od wysokiej jakości wykonania

elementu obrazującego Light Sword, która jest trudna do osiągnięcia ze względu na asymetryczny kształt i obecność stromego uskoku.

4. Opis pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych po uzyskaniu stopnia doktora

4.1 Quasi-statyczny holograficzny wyświetlacz przezierny typu Head-Up Display

Wyświetlacze przezierne zakładają nakładanie wyświetlonych wirtualnych obrazów na przestrzeń obserwowaną na wskroś przez samo urządzenie. Pomimo coraz szerszego rozpowszechnienia w przemyśle, ich cena jest zaporowa dla ekonomicznego segmentu np. samochodów. Dlatego prowadziłem badania na temat ekonomicznych wyświetlaczy opartych na statycznym hologramie Fouriera z multipleksacją kątową [29]. Pomysł polegał za zapisie kilkunastu hologramów Fouriera przedstawiających symbole inspirowane motoryzacją na powierzchni jednego złożonego hologramu z podziałem powierzchni hologramu funkcją szachownicy (tzn. dwuwymiarową funkcją Ronchiego). Aby umożliwić wybiórcze odtwarzanie konkretnego symbolu, wszystkie sub-hologramy zostały zapisane z częstością nośną (czyli z nałożonym czynnikiem fazowym siatki dyfrakcyjnej piłokształtnej), dopasowaną do pewnego konkretnego kąta padania wiązki oświetlającej. Dzięki temu wybór symbolu, który widzi się patrząc na wskroś przez strukturę zależy od kąta padania światła na hologram [30]. Stosując wiele quasi-punktowych źródeł światła i przetaczając je uzyskano możliwość quasi-animowanego wyświetlacza prostych obiektów. Niewielką ilość zapisanych obrazów można uzasadniać niską ceną finalnego urządzenia oraz faktem, że w trybie przeziernym kierowcy niezbędne są tylko symbole najbardziej krytyczne ze względów bezpieczeństwa. Przy czym należy nadmienić, że wyświetlacz nie może w żaden sposób zaburzać widzenia świata za szybą przednią samochodu/motocykla. Z tego powodu specjalnie obniżyliśmy wydajność dyfrakcyjną wykonanego elementu binarnego do wartości śladowej - dzięki temu po wyłączeniu wszystkich źródeł światła struktura ma w przybliżeniu przejrzystość zwykłej szybki szklanej. Na podstawie przeprowadzonych testów i symulacji numerycznych zostały wytworzone przy użyciu techniki elektrono-litografii hologramy złożone, mogące być powielane masowo jako podstawa do pilotowej serii wyświetlaczy HUD. Dzięki prostocie cena finalnych urządzeń nie powinna przekroczyć kilkunastu euro. Obecnie prowadzone są prace nad implementacją pomysłu w segmencie kasków motocyklowych, ze względu na znacznie uproszczone (w porównaniu z samochodami) pozycjonowanie elementu dyfrakcyjnego w stosunku do oka kierowcy.

4.2 Jedno-ekspozycyjna holografia cyfrowa

Metoda holografia cyfrowa z przesunięciem fazowym (ang. phase shifting digital holography) umożliwia akwizycję pełnej informacji o amplitudzie i fazie pól świetlnych, a uzyskane komputerowo obrazy charakteryzują się brakiem oślepiającego pola zerowego rzędu oraz brakiem bliźniaczego obrazu sprzężonego. Wymaga to jednak wykonania kilku osobnych ekspozycji przy różnym opóźnieniu fazy wiązki referencyjnej, lub opcjonalnie jednoczesnego wykorzystania kilku macierzy detektorów, co mocno komplikuje i podraża układ optyczny. Z tego powodu prowadziłem badania nad nową techniką holografii cyfrowej, umożliwiającą uzyskanie dwóch lub czterech interferogramów holografowanej sceny w wyniku pojedynczej ekspozycji na macierzy CCD/CMOS o gęsto

upakowanych pikselach (o wielkości $3,45 \mu\text{m}$). Interferogramy takie, uzyskane eksperymentalnie, zostały poprawnie odtworzone numerycznie dając informację o przestrzennych rozkładach trójwymiarowych natężenia i fazy holografowanej sceny. Kluczowym i nowatorskim elementem wykorzystanym w torze światła była specjalna samo-obrazująca struktura SIDOE (ang. Self-Imaging Diffractive Optical Element) [31], która umożliwiała projekcję rozkładu fazy wiązki odniesienia, niezbędnego do phase-shifting'u, zdalnie (bezkontaktowo) na powierzchni elementu CCD/CMOS [32,33] z periodycznością dopasowaną do rozmiaru pikseli kamery. Dzięki wykorzystaniu efektu Talbota dokonano przestrzennego podziału pikseli macierzy światłoczułej na 2 lub 4 podzbiory realizujące interferogramy z innym stopniem przesunięcia fazowego wiązki odniesienia. Wykorzystany układ optyczny jest bardzo prosty i obecnie trwają prace nad jego miniaturyzacją i wykorzystaniem w praktyce przemysłowej.

Prowadziłem również badania nad prostszą odmianą holografii cyfrowej z wykorzystaniem światłowodów i sprzęgaczy kierunkowych do uproszczenia konfiguracji układu holografii cyfrowej poosiowej (ang. in-line digital holography). Wykorzystałem wraz z dyplomantami przetwarzanie multi-wielowłtkowe na kartach graficznych (GPU), dzięki czemu uzyskaliśmy barwne odtworzenia hologramów cyfrowych w czasie rzeczywistym [34] przy rozmiarach macierzy obliczeniowych od 1024 na 1024 punkty do 8192 na 8192 punkty, przy czym ten ostatni przypadek umożliwiał osiągnięcie szczególnie dużego pola widzenia. Dzięki obserwacji na żywo jakości obrazów rekonstruowanych z zarejestrowanych prążków interferencyjnych możliwe było justowanie w czasie rzeczywistym parametrów programu a także ustawień elementów optycznych aż do osiągnięcia najwyższej wydajności i jakości. Użyliśmy modyfikacji algorytmu obliczania propagacji według całki Fresnela, z odpowiednim przeskalowaniem umożliwiającym optymalne wykorzystanie powierzchni macierzy światłoczułej. Ponadto zastosowaliśmy czasowe uśrednianie szumu speklowego przez integrację natężeniową (niekoherentną) pól odtworzonych w kolejnych momentach czasu, przy nieznaczących mikro-ruchach światłowodów przenoszących wiązkę odniesienia, dzięki czemu zmieniał się rozkład odtwarzanych spekli. Z powodzeniem dokonaliśmy odczytu rozkładu fazy frontu falowego odbitego od badanego przedmiotu. Jakość natężeniowych odtworzeń barwnych z uśrednieniem spekli znalazła poklask w środowisku optycznym na konferencji *Digital Holography and 3-D Imaging 2013* w USA [35]. Obecnie prowadzę rozmowy ze środowiskiem medycznym, mające na celu znalezienie niszowego zastosowania omówionego rozwiązania w diagnostyce i zdalnym monitoringu czynności życiowych pacjentów w nietypowych sytuacjach.

4.3 Dyfrakcyjne kształtowanie promieniowania terahercowego

W zakresie widzialnym i w bliskiej podczerwieni wytwarzanie elementów dyfrakcyjnych wiąże się z trudnościami w fabrykacji oraz dużymi kosztami ze względu na bardzo małą długość fali w stosunku do aktualnej precyzji maszyn produkcyjnych (np. obróbka skrawaniem komputerowym CNC, ablacja laserowa, elektroerozja, druk 3D, frez diamentowy). Takich ograniczeń nie ma zakres THz, gdzie długość fali w zakresie 0,1-1 mm umożliwia swobodne prototypowanie i produkcję elementów dyfrakcyjnych realizujących nawet najbardziej złożone funkcje optyczne, np. bardzo gęste siatki dyfrakcyjne, elementy subfalowe. Z tego powodu drugim najważniejszym kierunkiem moich badań od 2011 roku jest projektowanie, wykonywanie i testowanie elementów dyfrakcyjnych w układzie emiter - element dyfrakcyjny - detektor, pracującym w zakresie 0,1-2 THz. Wykorzystany jest układ spektroskopii czasowo-rozdzielczej (ang. Time Domain Spectroscopy, TDS) z pozycjonowaniem goniometrycznym detektora, dzięki czemu możliwe jest zdejmowanie pełnych kątowych

charakterystyk widmowych badanych elementów dla dowolnego stanu polaryzacji. Pełnemu procesowi projektowania, wykonania i badania zostały poddane proste struktury typu soczewka sferyczna, soczewka asferyczna, siatka pryzmatyczna, siatka binarna oraz bardziej skomplikowane, asymetryczne struktury łączące funkcje soczewki i pryzmatu. Elementy były wykonane w czterech różnych technologiach: wycinanie laserowe w papierze i metalu, skrawanie komputerowe teflonu i HDPE (Polietylen wysokiej gęstości), druk 3-D w plastikach akrylowych utwardzanych ultrafioletem. W szczególności zaobserwowano efekt pryzmatu w zerowym rzędzie dyfrakcji dla siatki metalowej [36] oraz opisano poprawne i wydajne działanie metalowej struktury ogniskująco-odchylającej wiązkę THz [37], której unikalną cechą jest całkowita separacja pola zerowego rzędu ugięcia od użytecznego sygnału, który zwykle jest bardzo słaby.

Brałem również udział w zaprojektowaniu, wytworzeniu i charakteryzacji w układzie TDS wysoko wydajnej dwustronnej soczewki plastikowej o szerokopasmowym działaniu skupiającym, charakteryzującej się skorygowanymi aberracjami geometrycznymi w wyniku optymalizowanego numerycznie, asferycznego kształtu przebiegu opóźnienia fazowego [38]. W szczególności opracowałem metodę "quasi ray-tracingu" umożliwiającą pomiar i wykreślenie kierunku skupiania promieni THz przez soczewkę w poszczególnych jej regionach. Wykorzystując tę technikę wykazałem zniesienie aberracji sferycznej w optymalizowanej wersji soczewki. Fabrykacja tej asferycznej i złożonej struktury nie byłaby możliwa bez użycia dostępnych od niedawna drukarek 3D.

Kolejnymi obiektami, które badałem w układzie TDS były zaskakująco wydajnie działające płaskie soczewki wykonane z wycinanych laserowo warstw papieru. Wycinane struktury stanowiły amplitudowo-fazowe płytki strefowe, których główną zaletą jest niski koszt przy dużej średnicy, co predestynuje je do wstępnego prototypowania elementów, a także do celów dydaktycznych i demonstracyjnych [39]. Metoda TDS została również wykorzystana do precyzyjnego zmierzenia współczynników załamania i absorpcji dwóch rodzajów użytego papieru. Prace prowadziłem w ramach 5-miesięcznego stażu naukowego na Université de Savoie w miejscowości Le Bourget du Lac we Francji (grupa prof. Jean-Louis Coutaz). Obecnie uczestniczę w pracach mających na celu skonstruowanie układu THz umożliwiającego obrazowanie przy użyciu soczewek o dużej aperturze (do 30 cm) do przyszłych zastosowań np. w skanerach bezpieczeństwa.

Michał Malinowski

LITERATURA:

- ¹ M. Sypek, "Light propagation in the Fresnel region. New numerical approach," *Opt. Commun.* 116, 43 (1995).
- ² R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures," *Optik* 35, 237 (1972).
- ³ T. Peter, F. Wyrowski, and O. Bryngdahl, "Importance of initial distribution for iterative calculation of quantized diffractive elements," *J. Mod. Opt.* 40, 591–600 (1993).
- ⁴ M. Nieto-Vesperinas, R. Navarro, and F. J. Fuentes, "Performance of a simulated-annealing algorithm for phase retrieval," *J. Opt. Soc. Am. A* 5, 30-38 (1988).
- ⁵ A. Georgiou, T.D. Wilkinson, N. Collings, and W.A. Crossland, "An algorithm for computing spot-generating holograms," *J. Opt. A* 10 (2008).
- ⁶ M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, and D. W. Sweeney, "Synthesis of digital holograms by direct binary search," *Appl. Opt.* 26, 2788-2798 (1987).
- ⁷ Fienup, James R. "Phase retrieval algorithms: a comparison." *Appl. Opt.* 21 2758-2769 (1982).
- ⁸ J. R. Fienup, "Phase retrieval algorithms: a personal tour [Invited]," *Appl. Opt.* 52, 45-56 (2013).
- ⁹ Wolfgang Osten, Nadya Reingand, "Optical Imaging and Metrology: Advanced Technologies," John Wiley & Sons (2012).
- ¹⁰ S. Osten, S. Krüger, A. Hermerschmidt, "New HDTV (1920x1080) phase-only SLM", *Proc. SPIE* 6487, 64870X (2007)
- ¹¹ K. Kakarenko, M. Zaremba, I. Ducin, M. Makowski, A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, M. Sypek, D. Wojnowski, Z. Jaroszewicz, A. Kołodziejczyk, "Utilization of an LCoS spatial light modulator's phase flicker for improving diffractive efficiency," *Proc. SPIE* 7746, 77461J (2010).
- ¹² J. G. Manni and J. W. Goodman, "Versatile method for achieving 1% speckle contrast in large-venue laser projection displays using a stationary multimode optical fiber," *Opt. Express* 20, 11288-11315 (2012).
- ¹³ T. Peter, F. Wyrowski, O. Bryndhal, "Importance of Initial Distribution for Iterative Calculation of Quantized Diffractive Elements," *Journal of Mod. Opt.* 40 (1993).
- ¹⁴ M. Makowski, "Toward extremely efficient, lensless, holographic laser projectors," *SPIE Newsroom*, 8 March 2013, DOI: 10.1117/2.1201302.004748 (invited) (2013).
- ¹⁵ Y. Takaki and M. Yokouchi, "Speckle-free and grayscale hologram reconstruction using time-multiplexing technique," *Opt. Express* 19, 7567-7579 (2011).
- ¹⁶ R. Dorsch, A. Lohmann, and S. Sinzinger, "Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display," *Appl. Opt.* 33, 869–875 (1994).
- ¹⁷ M. Makowski, G. Mikuła, M. Sypek, A. Kołodziejczyk "Three-plane phase-only computer hologram generated with iterative Fresnel algorithm", *Opt. Eng.* 44, 125805 (1-7) (2005).
- ¹⁸ M. Makowski, M. Sypek, A. Kołodziejczyk, G. Mikuła, J. Suszek "Iterative design of multi-plane holograms: experiments and applications", *Optical Engineering*, Vol. 46, No. 4, 045802 (2007).
- ¹⁹ J. J. Cowling, G. L. Williams, A. Purvis, R. McWilliam, J. J. Toriz-Garcia, N. L. Seed, F. B. Soulard, and P. A. Ivey, "Three-dimensional holographic lithography by an iterative algorithm," *Opt. Lett.* 36, 2495-2497 (2011).
- ²⁰ M. Makowski, M. Sypek, and A. Kołodziejczyk, "Colorful reconstructions from a thin multi-plane phase hologram," *Opt. Express* 16, 11618-11623 (2008).
- ²¹ T. Shimobaba, T. Takahashi, N. Masuda, T. Ito, "Numerical study of color holographic projection using space-division method," *Opt. Expr.* 19, 10287-10292 (2011).
- ²² M. Makowski, G. Mikula, M. Sypek, A. Kołodziejczyk, "Diffractive elements with extended depth of focus," *Proc. SPIE* 5484, 475-481 (2004).

-
- ²³ G. Mięka, A. Kołodziejczyk, M. Makowski, Cz. Prokopowicz, M. Sypek „Diffractive elements for imaging with extended depth of focus”, Opt. Eng. 44, 058001 (1-7) (2005).
- ²⁴ G. Mięka, A. Kołodziejczyk, M. Makowski, M. Sypek „Optical diffractive elements for medical applications”, Proc. SPIE 5954, 59540Q-1 (2005).
- ²⁵ Z. Jaroszewicz, A. Kołodziejczyk, M. Makowski, G. Mięka, I. Pawlak, K. Petelczyc, J. Suszek, M. Sypek, “Application of the Light Sword Optical Element in case of presbyopia,” Proc. SPIE 6187, 61871H-2 (2006).
- ²⁶ E. R. Dowski, and W. T. Cathey, "Extended depth of field through wave-front coding," Appl. Opt. 34, 1859-1866 (1995).
- ²⁷ M. Makowski, K. Petelczyc, A. Kołodziejczyk, Z. Jaroszewicz, I. Ducin, K. Kakarenko, A. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, M. Sypek, D. Wojnowski, "3D imaging with the light sword optical element and deconvolution of distance-dependent point spread functions," Proc. SPIE 7746, 77460O (2010)
- ²⁸ J. H. Seldin, and J. R. Fienup, "Iterative blind deconvolution algorithm applied to phase retrieval," JOSA A 7, , 428-433 (1990).
- ²⁹ J. Suszek, M. Makowski, M. Sypek, A. Siemion, A. Kołodziejczyk, A. Bartosz "A new phase encoding approach for a compact head-up display," Proc. SPIE 7141, 714124 (2008).
- ³⁰ J. Suszek, M. Makowski, M. Sypek, A. Siemion, A. Kołodziejczyk, "Angle-dependent encoding of multiple asymmetric symbols in a binary phase hologram with a spatial segmentation," Appl. Opt. 48, 270-275 (2009).
- ³¹ A. Fajst, M. Sypek, M. Makowski, J. Suszek, A. Kołodziejczyk "Optical properties of the self-imaging phase mask used in digital holography with phase-shifting," Proc. SPIE 7141, 714123-714123-7 (2008).
- ³² A. Siemion, M. Sypek, M. Makowski, J. Suszek, A. Siemion, D. Wojnowski, A. Kołodziejczyk, "One-exposure phase-shifting digital holography based on the self-imaging effect," Opt. Eng. 49, 055802-055802-5 (2010).
- ³³ A. Siemion, I. Ducin, K. Kakarenko, M. Makowski, A. Siemion, J. Suszek, M. Sypek, D. Wojnowski, A. Kołodziejczyk, "Digital holography with self-imaging by a two-step phase element," Phot. Lett. Pol. 2, 91-93 (2010).
- ³⁴ A. Kowalczyk, M. Bieda, M. Makowski, M. Sypek, A. Kołodziejczyk, "Fiber-based real-time color digital in-line holography," App. Opt. 52, 4743-4748 (2013).
- ³⁵ A. Kowalczyk, M. Bieda, M. Makowski, M. Sypek, A. Kołodziejczyk, "Fiber-based real-time color digital in-line holography," Digital Holography and 3-D Imaging 2013, Kohala Coast, USA, 21-25.04.2013.
- ³⁶ E. Hérault, J.-L. Coutaz, A. M. Siemion, A. Siemion, M. Makowski, M. Sypek, "Prism-like behavior at terahertz frequencies of a 2D metallic grid with a varying periodicity," J. Infrared Milli. Terahz Waves 32, 403-406 (2011).
- ³⁷ A. M. Siemion, A. Siemion, M. Makowski, M. Sypek, E. Hérault, F. Garet, and J.-L. Coutaz, "Off-Axis Metallic Diffractive Lens for Terahertz Beams," Opt. Lett. 36, 1960-1962 (2011).
- ³⁸ M. Sypek, M. Makowski, E. Hérault, A. M. Siemion, A. Siemion, J. Suszek, F. Garet, J.-L. Coutaz, "Highly efficient broadband double-sided Fresnel lens for THz range," Opt. Lett. 37, 2214-2216 (2012)
- ³⁹ Ag. Siemion, An. Siemion, M. Makowski, J. Suszek, J. Bomba, A. Czerwinski, F. Garet, J.-L. Coutaz, M. Sypek, "Diffractive paper lens for terahertz optics," Opt. Lett. 37, 4320-4322 (2012).

M. Sypek

