
Współczesna holografia na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej

Michał Makowski*

Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej

Abstrakt. Opisano współczesne dokonania Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej w dziedzinie holografii klasycznej, cyfrowej i komputerowej, w odniesieniu do pojęcia dwuetapowego obrazowania zaproponowanego po raz pierwszy przez prof. Mieczysława Wolfkego. W szczególności omówiono osiągnięcia w metrologii i wyświetlaniu obrazów z wykorzystaniem fazowych modulatorów ciekłokrystalicznych, jak i nowatorskich materiałów optomagnetycznych.

Słowa kluczowe: holografia, obrazowanie, optyka falowa

Abstract. The article discusses the contemporary achievements of the Faculty of Physics of the Warsaw University of Technology in the field of classical, digital and computer holography in relation to the concept of two-stage imaging proposed for the first time by prof. Mieczysław Wolfke. In particular, the achievements in metrology and image display with the use of phase-only liquid crystal modulators and innovative opto-magnetic materials are discussed.

Keywords: holography, imaging, wave optics

Wstęp

Holografia – ta niezwykle technika obrazowania często wymyka się próbom poprawnego jej zdefiniowania. Wiele popularnych definicji jest nie do końca trafnych, gdyż odnoszą się one do wybranych, szczególnych jej cech lub przypadków. Większość ludzi określiłaby hologram jako zdjęcie trójwymiarowe, podczas gdy po pierwsze istnieje wiele innych technik autostereoskopowych oferujących efekt przestrzenności, a po drugie istnieją hologramy obiektów płaskich, stosowane do specjalistycznych celów, np. do skupiania wiązek laserowych na preparatach biologicznych w celu tzw. pułapkowania optycznego. Obecnie degradacja pojęcia hologramu doszła już do tego poziomu, że mianem tym określa się mylnie każdy obraz „zawieszony w powietrzu”, co oczywiście zrealizować można właściwie dowolną klasyczną techniką obrazującą, pod warunkiem sprytnego ukrycia ramek ekranu przed wzrokiem użytkownika. Na przykład w aktualnie dostępnych goglach rozszerzonej rzeczywistości (ang. *augmented reality*, AR) płaskie obrazy urojone prezentowane są przez półprzezroczysty kombiner (ang. *combiner*) optyczny o tak dużych rozmiarach kątowych, że oko nie dostrzega jego granic powodując wspomnianą iluzję.

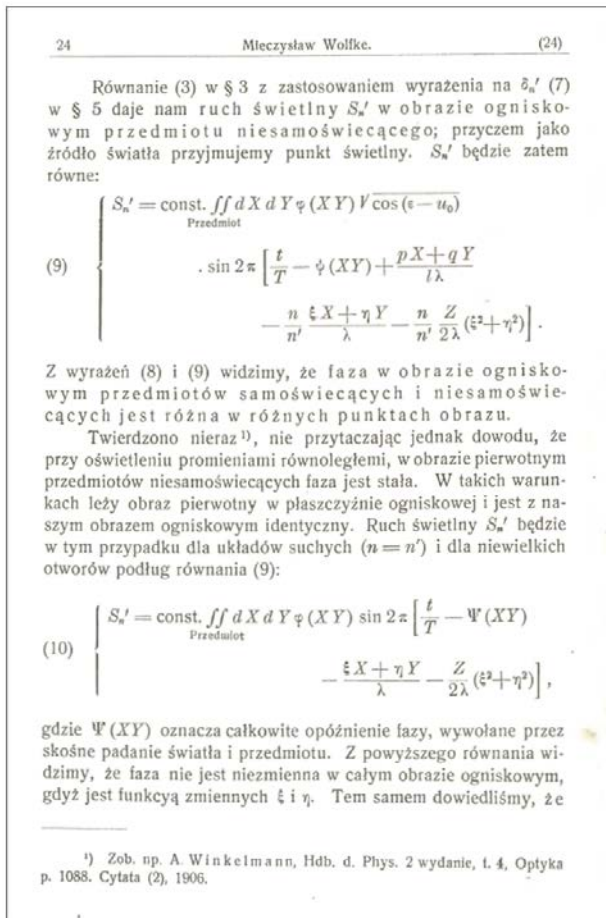
Tymczasem najprościej główną różnicę pomiędzy klasycznym obrazowaniem a hologafią można wyłuskać skupiając się na dwóch etapach tworzenia się obrazu. W klasycznym obrazowaniu światło odbite, roz-

proszone lub ugięte (w ogólności zmodyfikowane) przez przedmiot trafia do pierwszego układu optycznego (np. pojedynczej soczewki), którego zadaniem jest stworzyć pośrednie pole dyfrakcyjne. Jednak światło nie zatrzymuje się tu, ale propaguje natychmiast dalej, do drugiego układu optycznego, który przetwarza pole pośrednie na obraz końcowy, powstający na płaszczyźnie detektora (którym może być siatkówka oka obserwatora). Przy tym należy pamiętać, że wszelkie świadomie projektowane różnice w funkcjach optycznych pierwszego i drugiego z wyżej wspomnianych układów optycznych determinują funkcjonalność całego procesu obrazowania, np. jego powiększenie, rozdzielczość, jakość, zmiany geometrii obrazu, wielkość źrenicy wyjściowej, aberracje itp. Natomiast kluczową cechą jest to, że pośrednie pole dyfrakcyjne nie ma tu utrwalonej formy fizycznej, ale jest pewnym tworem ulotnym.

Zupełnie inaczej pod tym względem wygląda holografia, w której wspomniane dwa układy optyczne są od siebie rozdzielone w czasie lub/i przestrzeni. Trójwymiarowe, zespolone pole pośrednie jest trwale zapisywane w ośrodku materialnym (co nazywamy zapisem holograficznym), po czym, w ogólności w innym miejscu i czasie, jest wykorzystywane do utworzenia obrazu końcowego (co nazywamy odtworzeniem lub rekonstrukcją obrazu z hologramu). Taki dwuetapowy proces obrazowania zaproponował jako pierwszy Mieczysław Wolfke w swojej pracy *O możliwości optycznego obrazowania sieci molekularnych* z 1920 roku [4]. Jak słusznie zauważył,

*ORCID: 0000-0001-7139-0374

przeprowadzenie obrazowania sieci krystalicznej w jednym etapie i z użyciem jednej długości fali światła jest niemożliwe ze względu na konieczność stosowania niezwykle krótkich fal rentgenowskich, które nie podlegają kształtowaniu przy użyciu np. soczewek i zwierciadeł. Był jednak świadom możliwości, jakie daje teoria obrazowania Abbego [1], którą uprzednio w swojej pracy habilitacyjnej [2] uzupełnił o istotny przypadek obrazów w układach rozogniskowanych, przy oświetleniu równoległym.



Ryc. 1. Zdjęcie strony rozprawy habilitacyjnej Mieczysława Wolfkego, w tłumaczeniu autorskim. Równanie (10) zawiera istotny dodatek fazowy, zależny od odległości obrazowania Z [3]

Mając to na uwadze zaproponował podzielenie aktu obrazowania na dwa etapy: etap pierwszy polegał na zapisie pola dyfrakcyjnego pośredniego na kliszy fotograficznej, w drugim etapie ta wywołana i utrwalona fotografia stanowiła przezroczę, na którym zachodziła dyfrakcja światła odtwarzającego, powodując tym samym formowanie się końcowego obrazu. *Nota bene*, wykorzystanie dyfrakcji światła w drugim etapie jest również cechą charakterystyczną holografii. Jak wykazał Wolfke, tak prosta fotograficzna metoda zapisu pośredniego pola dyfrakcyjnego, ograniczona do jego natężenia, miała sens tylko dla najprostszyc przedmiotów czysto amplitudowych (czyli pozbawionych zmian fazy) i posiadających

symetrię obrotową względem osi optycznej [4]. Z drugiej strony już tak proste podejście pozwalało na wykorzystanie dwóch różnych długości fali światła w procesie zapisu i rekonstrukcji, pozwalając na uzyskanie olbrzymich powiększeń obrazowania. Pomimo bardzo prymitywnych źródeł światła kwazimonochromatycznego w owym czasie (żółta linia lampy sodowej), udało się również doświadczać potwierdzić działanie tego dwuetapowego procesu.

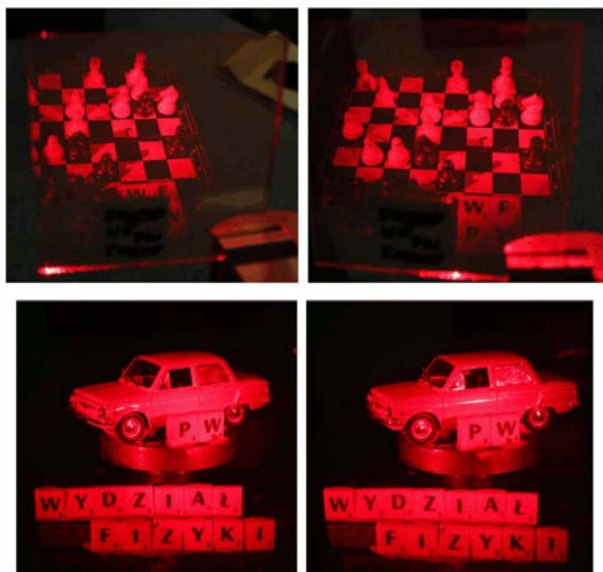
$$S_2 = \text{const} \iint_{\text{przedm.}} dXdY \varphi(X,Y) \iint_{\text{wzór dyf.}} d\xi d\eta \sin 2\pi \left[\frac{t}{T} - \frac{\xi \left(x - X \frac{\lambda}{\lambda'} \right)}{\lambda} - \frac{\eta \left(y - Y \frac{\lambda}{\lambda'} \right)}{\lambda} \right]$$

Ryc. 2. Wzór (7) z pracy Mieczysława Wolfkego na amplitudę zespoloną obrazu końcowego, tworzono go przez wzór dyfrakcyjny zapisany uprzednio w formie przezroczca; zwraca uwagę możliwość użycia w dwóch etapach różnych długości fali (λ, λ') celem uzyskania dowolnego powiększenia tak pojętego obrazowania [4]

Metodę dwuetapowego obrazowania znacznie udoskonalił i nazwał *hologafią* Denis Gabor, który miał dostęp do wiedzy o eksperymentach W. L. Bragga [6], analogicznych do eksperymentów Wolfkego, oraz do prac Fritsa Zernikego, który zastosował spójną falę odniesienia jako pewną referencję do opisu aberracji fazy powodowanych przez niedoskonałe soczewki. Dopiero połączenie tych dwóch komponentów umożliwiło zapis w obrazie pośrednim całej (czyli amplitudowo-fazowej) informacji o świetle, w wyniku interferencji wiązki przedmiotowej i odniesienia [7]. To zapoczątkowało rozkwit holografii, poprzedzony jednakże jedenastoletnią „hibernacją” w oczekiwaniu na odkrycie lasera przez T. Maimana w 1960 roku.

Holografia klasyczna

Przeprowadzenie procesu zapisu hologramu metodą czysto optyczną wymaga spełnienia szeregu wymogów typowych dla pomiarów interferencyjnych. Zapis amplitudowo-fazowy wykorzystuje interferencję dwóch spójnych wiązek laserowych, których zaburzenie podczas ekspozycji nawet o ułamek długości fali powoduje tak znaczące przesunięcia prążków interferencyjnych, że kontrast naświetlenia znacząco spada. Z tego powodu zapis musi odbywać się w bardzo stabilnych warunkach, co oczywiście eliminuje wszelkie ruchome przedmioty. Wielkość kątową holografowanej sceny ogranicza skończona rozdzielczość przestrzenna emulsji światłoczułej, pozostająca zresztą w konflikcie z czułością tejże. Rozciągłość fizyczną holografowanych scen ogranicza również skończona droga spójności światła użytego lasera. Jednakże po przezwycięzeniu powyższych przeszkód, poprawnie naświetlony i odtworzony hologram analogowy (klasyczny) cieszy oczy niezwykle realistycznym i w pełni przestrzennym obrazem urojonym oryginalnego przedmiotu.



Ryc. 3. Obrazy urojone z pełną paralaksą dwukierunkową odtworzone pod różnymi kątami z hologramów wykonanych na Wydziale Fizyki PW w układzie typu Leitha-Upatnieksa (fot. J. Suszek)

W wielu grupach badawczych w świecie [8, 9], w tym także na Wydziale Fizyki PW udoskonala się proces zapisu analogowych hologramów, np. w kierunku uzyskania możliwie dobrego obrazu barwnego.

Holografia klasyczna, ze względu na swoje niewątpliwe zalety wizualne, ma dużo zastosowań w widowis-



Ryc. 4. Przykładowe hologramy odtwarzające obraz barwny autorstwa studentów Wydziału Fizyki PW; hologramy zostały naświetlone trzema wiązkami laserowymi o barwach składowych: czerwonej, zielonej i niebieskiej (fot. M. Makowski)

kowej prezentacji np. trójwymiarowych eksponatów muzealnych, treści reklamowych itp. Z drugiej strony bardzo dużym utrudnieniem na drodze do praktycznego jej zastosowania jest konieczność fizycznego dostarczenia holografowanego przedmiotu na stabilizowany stół optyczny oraz oświetlenia go równomierną wiązką laserową. O ile wymóg ten jest możliwy do spełnienia w przypadku małych obiektów, o tyle holografowanie np. samochodu do celów reklamy wielkopowierzchniowej jest teoretycznie możliwe, ale wyjątkowo niepraktyczne. Z tego powodu stosuje się metody hybrydowe, w których zapis holograficzny jest dokonywany nie na całej powierzchni hologramu, ale po kolei w obszarach rzędu $1 \times 1 \text{ mm}^2$, przy czym w każdym akcie takiego

naświetlenia wiązka przedmiotowa jest modulowana przez matrycę ciekłokrystaliczną tak, by zakodować w danym obszarze niewielki fragment przedmiotu w pamięci komputera i możliwy do późniejszego odtworzenia z paralaksą poziomą. W emulsji światłoczułej następuje zapis lokalnych, bardzo gęstych siatek dyfrakcyjnych – badania nad tym efektem w azopolimerach są obecnie realizowane również na WF PW [10]. Dzięki takiemu zapisowi możliwe jest odwzorowanie dowolnych, w tym nieistniejących fizycznie przedmiotów oraz dodanie efektu animacji widocznej w miarę jak obserwator przemieszcza się wzdłuż hologramu w kierunku poziomym.



Ryc. 5. Animowany, barwny hologram pokazowy upamiętniający prof. Mieczysława Wolfkego, zaprojektowany i zainstalowany na Wydziale Fizyki PW (projekt, fot. M. Makowski)

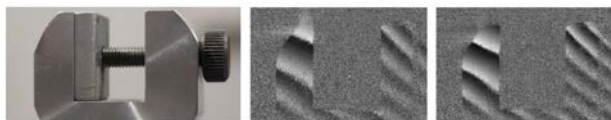
Holografia cyfrowa

Wraz z nastaniem ery cyfrowej szybko okazało się, że dwa etapy obrazowania holograficznego można rozdzielić i stosować osobno. Mówiąc wprost, pierwszy etap obrazowania holograficznego polegający na fizycznym zapisie prążków interferencyjnych można wykorzystać do celów pomiarowych, o ile emulsję światłoczułą zastąpi się matrycą elektronicznych detektorów typu CMOS lub CCD. Zajmuje się tym dziedzina nazywana holografia cyfrową (ang. *digital holography*). Z kolei eliminując całkowicie pierwszy etap obrazowania holograficznego i zastępując fizyczną rejestrację hologramu symulacją numeryczną, wchodzimy w zakres badań dziedziny zwanej holografia komputerową lub syntetyczną (ang. *computer-generated holography*, CGH). Dzięki tym odkryciom holografia, pomimo wewnętrznej niekompatybilności ze światem cyfrowym, zyskała dynamikę i walory aplikacyjne.



Ryc. 6. Barwne obrazowanie bezsoczewkowe w trybie holografii cyfrowej. Od lewej do prawej: przedmiot, odtworzenie hologramu cyfrowego z jednej ekspozycji, uśrednione odtworzenia z czterech kolejnych ekspozycji pozwalają na zmniejszenie widoczności szumu koherentnego [13]

Pośród prac prowadzonych na Wydziale Fizyki PW w dziedzinie holografii cyfrowej można wymienić zdalne, bezsoczewkowe obrazowanie barwne za pomocą interferometrii wykorzystującej światłowody jednomodowe. W tym eksperymencie zapisano prążki interferencyjne na macierzy CMOS kamery cyfrowej, podczas gdy rekonstrukcja holograficzna odbyła się w postaci numerycznej propagacji frontu falowego na znaną odległość zmierzoną w układzie optycznym. Przedmiot był jednocześnie oświetlony trzema wiązkami laserowymi o barwach składowych, tak by uzyskać wierne oddanie jego oryginalnych kolorów. Zaprezentowana technika cechuje się łatwością zestawienia układu oraz możliwością szybkiego justowania parametrów odtworzenia dzięki pracy w czasie rzeczywistym – wszelkie obliczenia realizowano ze wspomaganiami sprzętowym za pomocą karty graficznej. Ciekawą możliwością, którą daje holografia cyfrowa, jest elektroniczna kompensacja wszelkich aberracji geometrycznych, które pojawiają się w układzie, poprzez dobór odpowiednich fazowych funkcji korekcyjnych implementowanych w procedurze odtwarzania obrazu. Naturalnie, samo obrazowanie przedmiotu w dziedzinie natężenia nie wyczerpuje możliwości holografii cyfrowej, która pozwala też na ultraprecyzyjne pomiary położenia i przemieszczeń badanych obiektów. Rycina 7

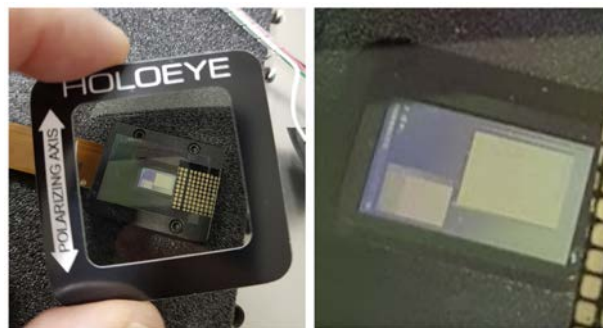


Ryc. 7. Prążki interferencyjne w odtworzeniu numerycznym hologramu cyfrowego pozwalają na mierzenie odkształceń powstałych np. w wyniku rozszerzalności termicznej. Od lewej do prawej: przedmiot, faza różnicowa dla wiązki czerwonej (660 nm), faza różnicowa dla wiązki zielonej (532 nm) [13]

przedstawia pomiar odkształceń przedmiotu ogrzewanego pomiędzy dwoma kolejnymi ekspozycjami. Widoczne prążki są efektem odejmowania zespolonego interferogramów przed i po odkształceniu przedmiotu w wyniku rozszerzalności termicznej. Badając precyzyjnie przesunięcia prążków można mierzyć odkształcenia rzędu setnych części długości fali użytego światła, co w połączeniu z bezkontaktowym charakterem pomiaru pozwala traktować holografię cyfrową jako atrakcyjny sposób np. na zdalną defektoskopię czasu rzeczywistego. Ponadto, jednoczesne wykorzystanie kilku wiązek laserowych o różnych długościach fali pozwala na zwiększenie precyzji pomiaru. Wiele grup badawczych na świecie rozwija również metody holograficznych pomiarów w pełni trójwymiarowych na zasadzie tomografii, w tym obiektów biologicznych w modzie mikroskopowym [11, 12].

Holografia generowana komputerowo

Kolejną atrakcyjną możliwością ograniczenia obrazowania holograficznego do jednego etapu jest holografia komputerowa, w której etap zapisu interferencyjnego jest zastępowany odpowiednim algorytmem komputerowym tworzącym numeryczną postać hologramu na podstawie cyfrowej reprezentacji holografowanej sceny. Powstały w ten sposób hologram, będący w istocie dyskretną macierzą liczb zespolonych, musi zostać skopiowany do ośrodka, który będzie fizycznie modulował światło wiązki rekonstruującej hologram komputerowy. Istnieje wiele takich ośrodków, ale na szczególną uwagę zasługują ciekłokrystaliczne, przestrzenne modulatory światła (ang. *spatial light modulator*, SLM).



Ryc. 8. Przestrzenny modulator światła przesuwający fazę światła w każdym z 8 milionów pikseli o rozmiarze 3,74 μm . Obraz wyświetlony na panelu jest widoczny dzięki zastosowaniu polaryzatora (fot. M. Makowski)

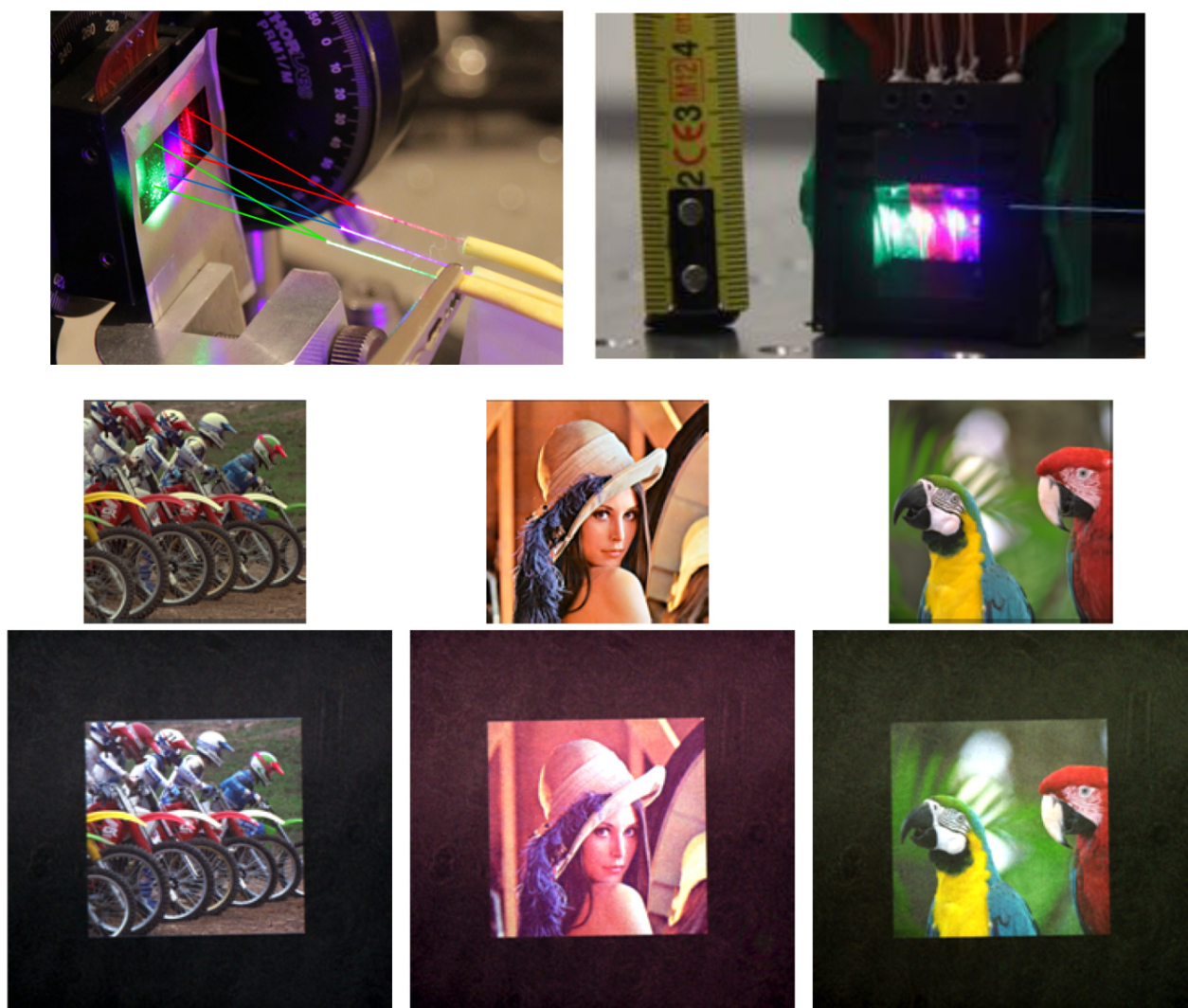
Dzięki technologii LCoS (ang. *liquid crystal on silicon*) światło padające na panel SLM przechodzi dwukrotnie przez warstwę ciekłego kryształu, umożliwiając szybsze czasy reakcji niż znane z modulatorów pracujących w trybie transmisyjnym. Dzięki polu elektrycznemu indukowanemu za pośrednictwem elektrod doprowadzonych do każdego z 8 milionów pikseli, możliwe jest w pełni indywidualne przesuwanie fazy liniowo spolaryzowanego światła propagującego się przez dany piksel w wyniku zmian orientacji molekuł ciekłego kryształu. Zatem wyświetlenie na panelu SLM wzoru dyfrakcyjnego, będącego spróbkowaną wersją hologramu fazowego, umożliwia w dalekim polu odtworzenie obrazu. Oczywiście jakość obrazu jest dużo niższa, co wynika z faktu, że liczba pikseli SLM jest o 5 rzędów wielkości mniejsza niż liczba ziaren dokonujących absorpcji światła w klasycznej emulsji holograficznej. Z drugiej strony SLM oferuje dwie zasadnicze zalety predestynujące do zastosowań praktycznych: możliwość aktualizowania hologramu z częstotliwością kilkudziesięciu lub nawet kilkuset Hz oraz zwiększoną wydajność dyfrakcyjną procesu rekonstrukcji. O ile pierwsza zaleta wydaje się oczywista, o tyle druga wymaga krótkiego omówienia. Hologram komputerowy fazowy można rozumieć

jako zestaw lokalnych siatek dyfrakcyjnych o profilu kinofornu, w którym faza narasta asymetrycznie w wybranym kierunku. Taka siatka teoretycznie jest w stanie osiągnąć 100% wydajność dyfrakcyjną, uginając kierunek propagacji światła z pełną wydajnością w sposób bezstratny. Z kolei w hologramie klasycznym każda lokalna siatka dyfrakcyjna powstaje w wyniku interferencji dwóch wiązek, zatem ma profil sinusoidalny. Symetria profilu oznacza, że dyfrakcyjne ugięcie światła nie może mieć preferowanego kierunku, zatem odbywa się po równo w dodatnich i ujemnych rzędach ugięcia. W konsekwencji całkowita wydajność powierzchniowego (nie objętościowego) hologramu klasycznego nie może przekroczyć 50%.

Zwiększona wydajność dyfrakcyjna oraz eliminacja pierwszego etapu obrazowania holograficznego pozwalają na skonstruowanie prostego i wydajnego pod względem energetycznym projektora obrazów barwnych, składającego się jedynie z czterech kluczowych komponentów:

3 źródeł światła oraz modulatora SLM, jak pokazano na ryc. 9 [14-16]. Jest to ogromne uproszczenie w porównaniu z klasycznymi projektorami zawierającymi dziesiątki części ruchomych i setki komponentów. Ponadto, uzyskano w ten sposób całkowite wydajności energetyczne projekcji rzędu 30-50%, co jest wynikiem ok. dziesięciokrotnie lepszym w porównaniu z klasyczną projekcją wykorzystującą selektywną absorpcję światła i obrazowanie obiektywem.

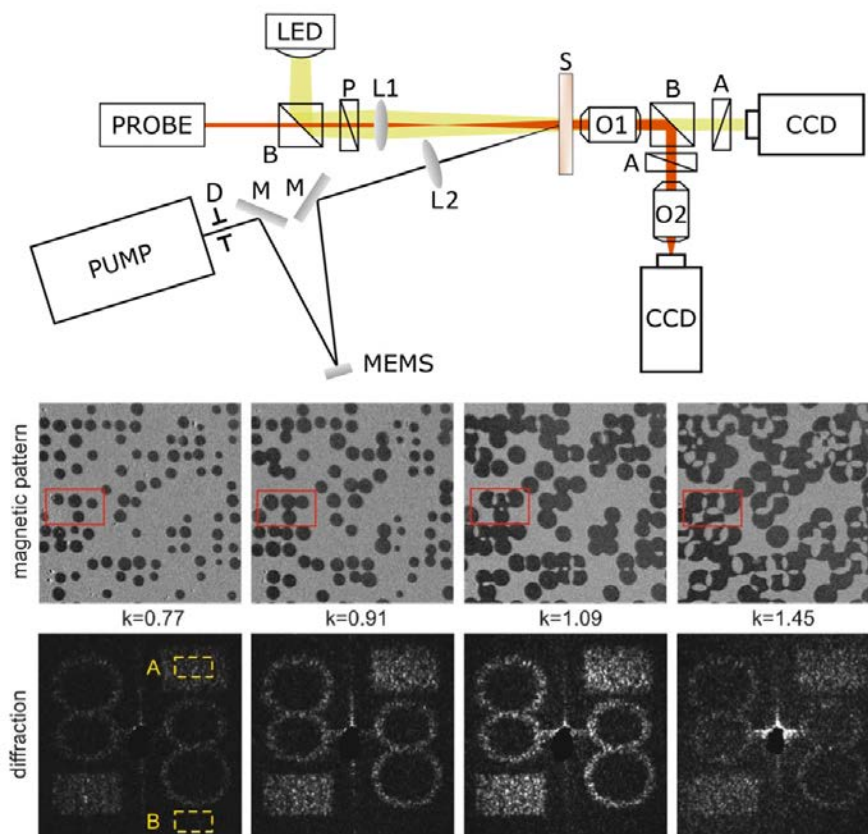
Osiągnięcie wysokiej jakości projekcji [16] pokazanej na ryc. 9 wymagało uprzedniego przezwyciężenia dwóch problemów: wysokiego zaszumienia specklowego obrazu oraz korekty płaskości optycznej modulatora SLM, która silnie zależy od jego temperatury [17]. Pierwszy problem został zidentyfikowany jako konsekwencja niekontrolowanych aktów interferencji pomiędzy promieniami tworzącymi sąsiadujące ze sobą punkty obrazu. Ze względu na quasilosowy charakter hologramów komputerowych iterowanym algorytmem Gerchberga-Saxtona [18],



Ryc. 9. W pełni funkcjonalny bezsoczewkowy projektor obrazów barwnych (demonstrator technologii, prototyp) oraz przykładowe projekcje eksperymentalne uzyskane na odległym ekranie [14-16]

| | | | | | | |
|--------------------------------------|---|--|---|---|---|---|
| b) | | | | | | |
| Corrected for T=25°C | | | | | | |
| Actual temperature | T=18°C $\Delta T = -7^\circ\text{C}$ | T=25°C $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ | T=26°C $\Delta T = +1^\circ\text{C}$ | T=27°C $\Delta T = +2^\circ\text{C}$ | T=28°C $\Delta T = +3^\circ\text{C}$ | T=34°C $\Delta T = +9^\circ\text{C}$ |
| c) | | | | | | |
| Corrected for the actual temperature | | | | | | |

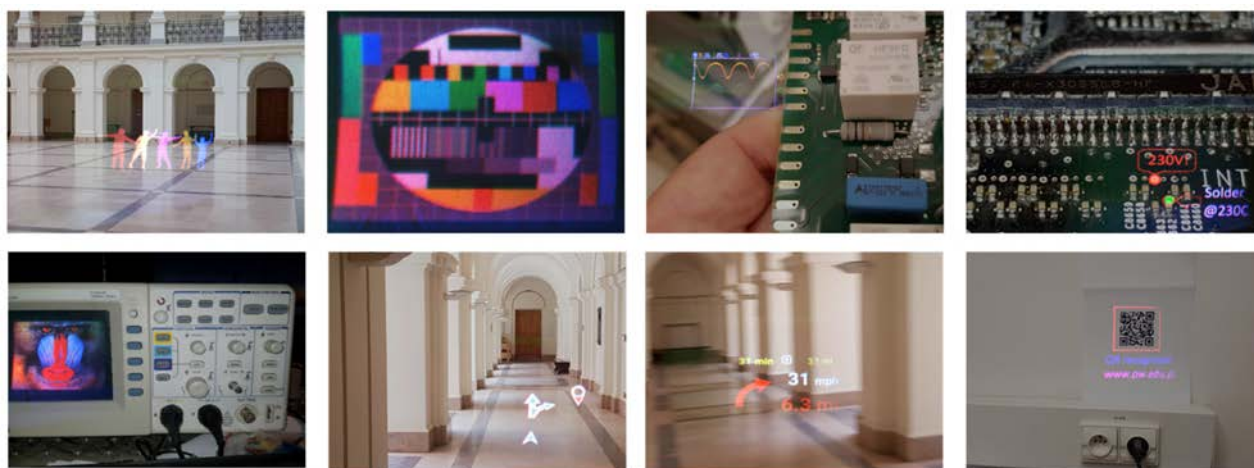
Ryc. 10. Wyniki korekcji płaszczyzny optycznej SLM w czasie rzeczywistym w funkcji temperatury oraz ich wpływ na jakość obrazowania pokazaną w maksymalnym powiększeniu [17]



Ryc. 11. Schemat układu do czysto optycznego przełączania domen magnetycznych w próbce (S) materiału optomagnetycznego CdFeCo wiązką sterowaną za pomocą zwierciadła mikromechanicznego MEMS; przykładowe wzory holograficzne zapisane dla różnych wartości energii w impulsie oraz eksperymentalne rekonstrukcje obrazów w dalekim polu [21, 23]

zależności fazowe pomiędzy kolejnymi fragmentami obrazu są losowe i w niekorzystnych przypadkach powodują powstanie ziaren szumu koherentnego w wyniku interferencji konstruktywnej lub destruktywnej. Rozwiązaniem zaproponowanym na Wydziale Fizyki PW było odsunięcie od siebie punktów obrazu tworzonych na ekranie w danej chwili [16]. Luki w obrazie utworzone w ten sposób są uzupełniane w kolejnych krokach przy liczbie klatek na sekundę, na którą pozwala tempo odświeżania

modulatora SLM. Tak wytworzone półobrazy zintegrowane natężeniowo dają w rezultacie spadek zaszumienia znacznie poniżej wartości mierzalnych na niechłodzonych macierzach detektorów CMOS. Drugi problem został przezwyciężony przez wprowadzenie do układu projekcyjnego możliwości podglądu jakości kształtu ogniska formowanego przez SLM poprzez wyświetlenie na nim wzorów fazowych soczewek skupiających o trzech różnych ogniskowych. Dzięki zastosowaniu algorytmu



Ryc. 12. Przykładowe projekcje obrazu w trybie przeziernym przez gogle rozszerzonej rzeczywistości (fot. M. Makowski)

iteracyjnego wykonującego pętlę propagacji pomiędzy trzema płaszczyznami ogniskowymi a płaszczyzną samego SLM, udaje się otrzymać rozkład fazowy tożsamy z wewnętrznym błędem fazowym SLM wynikającym z jego odkształcania się pod wpływem naprężeń mechanicznych, które powodowane są m.in. jego rozszerzalnością termiczną [17].

Omówione wyżej oraz inne usprawnienia w obliczaniu i wyświetlaniu hologramów komputerowych doprowadziły w wielu grupach badawczych [19, 20] do osiągnięcia ograniczonego dyfrakcyjnie obrazowania holograficznego z użyciem SLM, co oznacza dojście do kresu możliwości samego modulatora. Zasadniczą wadą ciekłokrystalicznych SLM (poza relatywnie długim czasem przełączania) jest spadek jakości modulacji i wzrost efektów przesłuchu międzypikselowego wraz z zagęszczeniem się struktury pikselowej, co jest niestety niezbędne do uzyskania wystarczająco dużych kątów projekcji obrazu z punktu widzenia zastosowań w elektronice użytkowej. Z tego powodu obecnie na Wydziale Fizyki PW we współpracy z Uniwersytetem w Białymstoku prowadzone są badania mające na celu zastąpienie modulacji ciekłokrystalicznej nowymi materiałami. Szczególnie obiecujące wydają się zapisywane optycznie materiały optomagnetyczne, w których wzory dyfrakcyjne tworzy się bez ustalonej *a priori* struktury pikseli, punkt po punkcie, z wykorzystaniem pojedynczych impulsów femtosekundowych z zakresu bliskiej podczerwieni [21]. Co ciekawe, akt przełączania domen magnetycznych światłem trwa tylko ok. 13 ps oraz jest zapisem trwałym aż do kolejnego przełączenia. Interesującą cechą zjawiska przełączania jest również jego progowy charakter, gdzie efekt następuje jedynie w miejscach o gęstości energii impulsu powyżej pewnego progu. To umożliwia zwiększenie gęstości zapisu holograficznego powyżej limitu dyfrakcyjnego, obowiązującego dla ustalonej apertury

numerycznej wiązki zapisującej [22]. Sama modulacja światła wiązki odtwarzającej odbywa się na zasadzie skręcenia Faradaya, którego wielkością można sterować zmieniając grubość i skład chemiczny próbki.

Niezwykle atrakcyjną cechą wyświetlaczy wykorzystujących holografie generowaną komputerowo, oprócz w pełni trójwymiarowego obrazowania, jest możliwość daleko idącej korekcji aberracji optycznych poprzez uwzględnianie w fazie hologramu wzorów korekcyjnych znoszących zniekształcenia geometryczne. Z tego powodu obrazowanie w trybie holograficznym jest najlepszą techniką w niezwykle kompaktowych układach wyświetlających w goglach wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości [24], gdzie tradycyjne refrakcyjne kompensowanie aberracji jest niemożliwe. Na Wydziale Fizyki PW opracowano szereg przyocnych wyświetlaczy przeziernych wykorzystujących holografie komputerową zapisywaną na SLM.

Dzięki możliwości elektronicznego korygowania aberracji optycznych, fizyczne elementy optyczne mogą mieć kształt sferyczny, co oznacza znacznie niższe koszty i prostotę justowania. Ponadto w pełni przestrzenne wyświetlanie, naturalne dla ludzkiego układu oko-mózg, pozwala na długie i komfortowe użytkowanie, co jest koronnym argumentem na korzyść holografii jako docelowej techniki obrazowania w optycznych urządzeniach przyszłych generacji.

Podsumowanie

Pomimo, że wiele już zostało zrobione na drodze do stworzenia doskonałych wyświetlaczy wykorzystujących dynamiczną, wysokorozdzielczą holografie komputerową, konieczny jest dalszy postęp w dziedzinie materiałów modulujących światło oraz przełom w możliwościach szybkiego dokonywania obliczeń holograficznych o astronomicznie dużych liczbach próbek. Pocieszeniem

jest to, że sama zasada formowania obrazu końcowego z wykorzystaniem dyfrakcji, zaproponowana przez Wolkego i wzbogacona przez Gabora, pozostaje niezmiennie uniwersalna, efektywna i elegancko prosta w działaniu w niezwykle szerokim zakresie konfiguracji optycznych i w wielu pasmach widma elektromagnetycznego.

Literatura

- [1] Abbe E., *Die Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop; bearbeitet und herausgegeben von O. Lummer u. F. Reiche*, Braunschweig (1910).
- [2] Wolfke M., „Allgemeine Abbildungstheorie selbstleuchtender und nicht selbstleuchtender Objekte”, *Annalen der Physik* (4), 39, 569 (1912).
- [3] Wolfke M., „Teoria ogólna obrazów optycznych”, *Wiadomości Matematyczne XVII* (1913).
- [4] Wolfke M., „Über die Möglichkeit der optischen Abbildung von Molekulargittern”, *Physikalische Zeitschrift* 21, 495-497 (1920).
- [5] Petelczyc K., Kędzierska E., *Mieczysław Wolfke. Gdyby mi dali choć pół miliona...* OWPW 2018.
- [6] Bragg W., „A New Type of ‘X-Ray Microscope’”, *Nature* 143, 678 (1939).
- [7] Gabor D., „A new microscopic principle”, *Nature* 161, 777-778 (1948).
- [8] Bjelkhagen H. I., Mirlis E., „Color holography to produce highly realistic three-dimensional images”, *Appl. Opt.* 47, A123-A133 (2008).
- [9] Gentet Y., Gentet P., „CHIMERA, a new holoprinter technology combining low-power continuous lasers and fast printing”, *Appl. Opt.* 58, G226-G230 (2019).
- [10] Kozanecka-Szmigiel A., Antonowicz J., Szmigiel D., Makowski M., Siemion A., Konieczkowska J., Trzebicka B., Schab-Balcerzak E., „On stress – strain responses and photoinduced properties of some azopolymers”, *Polymer* 140, 117-121 (2018).
- [11] Kozacki T., Krajewski R., Kujawińska M., „Reconstruction of refractive-index distribution in off-axis digital holography optical diffraction tomographic system”, *Opt. Express* 17, 13758-13767 (2009).
- [12] Kostencka J., Kozacki T., Kuś A., Kemper B., Kujawińska M., „Holographic tomography with scanning of illumination: space-domain reconstruction for spatially invariant accuracy”, *Biomed. Opt. Express* 7, 4086-4101 (2016).
- [13] Kowalczyk A., Bieda M., Makowski M., Sypek M., Kolodziejczyk A., „Fiber-based real-time color digital in-line holography”, *App. Opt.* 52, 4743-4748 (2013).
- [14] Makowski M., Ducin I., Kakarenko K., Suszek J., Sypek M., Kolodziejczyk A., „Simple holographic projection in color”, *Opt. Express* 20, 25130-25136 (2012).
- [15] Makowski M., Kowalczyk A., Bieda M., Suszek J., Ducin I., Shimobaba T., Nagahama Y., Ito T., „Miniature holographic projector with cloud computing capability”, *Appl. Opt.* 58, A156-A160 (2019).
- [16] Makowski M., „Minimized speckle noise in lensless holographic projection by pixel separation”, *Opt. Express* 21, 29205-29216 (2013).
- [17] Bolek J., Makowski M., „Non-invasive correction of thermally-induced wavefront aberrations of Spatial Light Modulator in holographic projection”, *Opt. Express* 27(7), 10193-10207 (2019).
- [18] Gerchberg R. W., Saxton W. O., „A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures”, *Optik* 35, 237-246 (1972).
- [19] Kozacki T., Chlipala M., „Color holographic display with white light LED source and single phase only SLM”, *Opt. Express* 24, 2189-2199 (2016).
- [20] Gopakumar M., Kim J., Choi S., Peng Y., Wetzstein G., „Unfiltered holography: optimizing high diffraction orders without optical filtering for compact holographic displays”, *Opt. Lett.* 46, 5822-5825 (2021).
- [21] Starobrat J., Frej A., Bolek J., Trybus R., Stupakiewicz A., Makowski M., „Photo-magnetic recording of randomized holographic diffraction patterns in a transparent medium”, *Opt. Lett.* 45, 5177-5180 (2020).
- [22] Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A. V., „Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium”, *Nature* 542, 71-74 (2017).
- [23] Makowski M., Kolodziejczyk M., Bomba J., Frej A., Sypek M., Bolek J., Starobrat J., Tsukamoto A., Davies C. S., Kirilyuk A., Stupakiewicz A., „Overlapping effect in dense all-optical, point-by-point recording of holographic patterns in the ferrimagnetic alloy”, *J. Magn. Magn. Mater.* 548, 168989 (2022).
- [24] Maimone A., Georgiou A., Kollin J. S., „Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality”, *ACM Transactions on Graphics (Tog)* 36.4, 1-16 (2017).