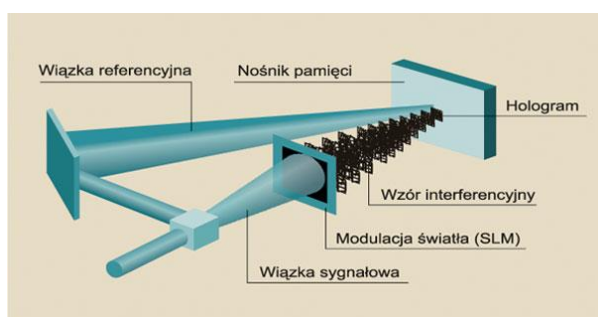


# Pamięci holograficzne

Zasady holografii znane są od dziesięcioleci, a już od dawna trwają prace nad holograficznymi nośnikami pamięci. Obecnie hologramy znajdują pojedyncze zastosowania jako nośniki pamięci, np. analogowe hologramy do identyfikacji banknotów, kart kredytowych i opakowań produktów. Nie udało się dotychczas zastosować holografii w masowo wytwarzanych urządzeniach pamięci.

Gdy ostatnio spadło tempo ulepszania technologii twardych dysków, zaczęto znów intensywnie szukać alternatywy na przyszłość. Pamięci holograficzne teoretycznie mogą wykorzystać całą objętość nośnika w trzech wymiarach. Tak duża gęstość zapisu stanie się potrzebna najpóźniej wraz z wprowadzeniem telewizji HDTV. Obrazy i filmy telewizji HDTV mają dziesięciokrotnie większą objętość niż media tradycyjne. Obecnie mianem pamięci holograficznych określa się również płaskie, ułożone warstwami nośniki, najczęściej w połączeniu z niebieskim laserem. Oparte na nim techniki pamięci oferują znacznie większą pojemność niż dotychczasowe i chyba będą mogły rozwiązać problemy, przynajmniej w perspektywie średniookresowej.

## Niebieski laser

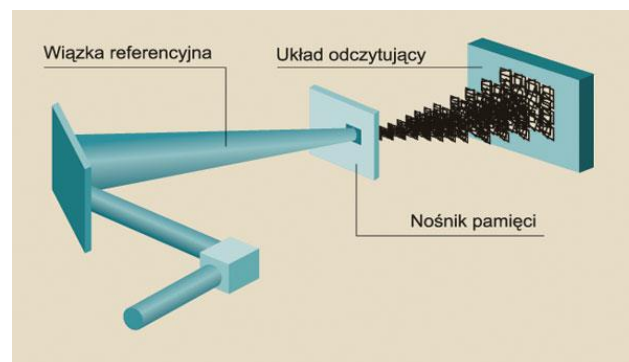


Rys. 1. Podczas zapisu dane są przez modulator światła (SLM) przetwarzane stronicowo na wzór.

Zastosowanie niebieskiego lasera w DVD umożliwia dzięki mniejszej długości fali świetlnej zapis znacznie mniejszych wgłębień (pits), a co za tym idzie, znaczne zwiększenie gęstości zapisu. Niebieski laser pracuje z falą o długości 405 nm, podczas gdy czerwony z falą o długości 635 do 650 nm. Zaletę wyższej rozdzielczości przy świetle o mniejszej długości fali można wykorzystać również w pamięciach holograficznych. Niestety, niebieskie światło lasera trudno uzyskać. Stosowane materiały nie są stabilne ani temperaturowo, ani odporne na upływ czasu. Badania w tym zakresie cały czas trwają. Szczerze mówiąc, trwa właściwie wyścig - kto pierwszy zbuduje działający, stabilny i nadający się do masowej produkcji niebieski laser na bazie azotku galu, ma szansę na fortunę. Według prognoz firmy badawczej Strategies Unlimited, sprzedaż aparatury wykorzystującej technologię niebieskiego lasera osiągnie w roku 2008 wartość 100 mld dolarów. Rządowe szacunki mówią, że polskie firmy mogą z tego uszczknąć zaledwie jakieś 2 mld dolarów. Bo przecież w tym wyścigu nie brak i polskich akcentów. Zespół kierowany przez profesora Sylwestra Porowskiego z Centrum Badań Wysokociśnieniowych PAN uzyskał na pewnym etapie doskonałe wyniki, niestety, zabrakło 30-40 mln złotych. Taka kwota była niezbędna, żeby powstał produkt komercyjny. Komitet

Badań Naukowych i prywatni inwestorzy zdołali zgromadzić łącznie około 24 mln złotych. Ostatecznie prawo do wykorzystania polskiego niebieskiego lasera zdobył w ramach projektu offsetowego koncern Lockheed Martin za śmieszną kwotę, 3 mln dolarów. Japońska firma Nichia prowadzi od lat pionierskie badania nad niebieskim laserem, uzyskując przy tym niejako po drodze liczne patenty. To z kolei prowadzi do rozlicznych sporów o prawa do patentów z firmami i konsorcjami, które chciałyby wprowadzić niebieski laser na rynek. Po sześciu latach sporów udało się doprowadzić do ugody między firmą Nichia a firmą Toyoda -też z Japonii. Na razie napędy i nośniki korzystające z niebieskiego lasera sprzedaje... Sony.

## Błękitne wariacje



Rys. 2. W trakcie odczytu za rozpoznanie wzoru odpowiada zwykle układ CCD

W segmencie napędów DVD z niebieskim laserem zapewne znów pojawią się różne formaty i walka o prymat na rynku. Firma Plasmon ( <http://www.plasmon.com> ) chce umieścić na płycie o wymiarach DVD 30 GB danych i uzyskać transfer 8 MB/s, korzystając z technologii Ultra Density Optical (UDO). Przyszłe generacje tej technologii mają zapewniać pojemności 60 i 120 GB. Plasmon pracuje nad nośnikami i napędami we własnym zakresie; firma przeznaczyła na badania 25 mln dolarów. W pewnym okresie w pracach brały udział firmy Sony i HP. Sony współpracuje również z Hitachi, Philipsem i

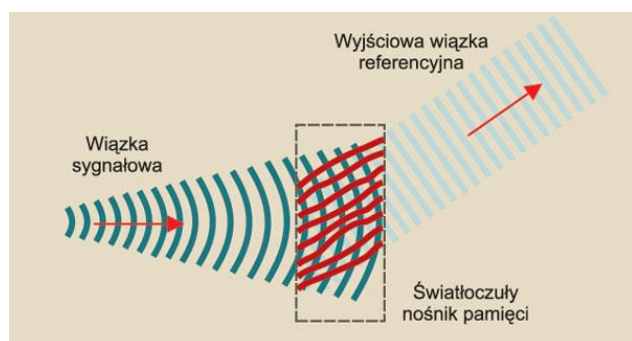
innymi firmami nad technologią Blue Ray Disc (BD) o pojemności nośnika 27 GB. Nośniki BD nie są kompatybilne z dotychczasowymi mediami DVD. Podstawowa licencja na BD ma kosztować 20 tysięcy dolarów, a licencja na ochronę treści - 120 tysięcy dolarów rocznie i 10 centów od napędu.

Producenci mediów mieliby płacić 8 tysięcy dolarów rocznie i 2 centy od płyty. Sony poinformował w grudniu 2003 roku o dostępności napędów DVD z niebieskim laserem i odpowiednich płyt o pojemności 23,3 GB. Transfer wynosi 9 MB/s.

Napęd ma kosztować około 3 tysięcy dolarów, a płyta - 45 dolarów. Toshiba i NEC propagują własny format

## Historia holograficznych technik pamięci masowych

Prace nad holograficznymi technikami pamięci masowych trwają od około czterdziestu lat, szczególnie w firmie IBM (centrum badawcze Almaden). W latach dziewięćdziesiątych rząd amerykański przekazał za pośrednictwem DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) miliony dolarów na badania. Ta sama agencja jest "odpowiedzialna" za powstanie pierwowzoru Internetu.

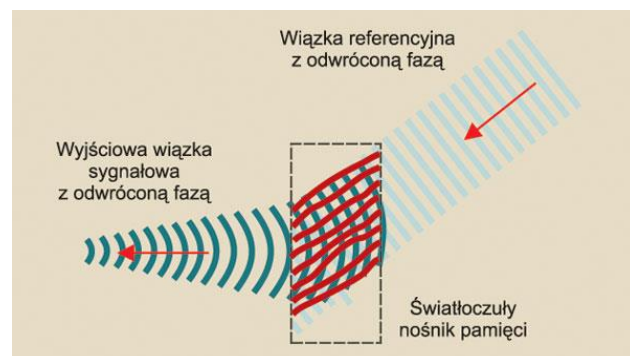


Rys 3. Gdy wiązka sygnałowa trafi na zmodulowany obraz, powstanie wiązka referencyjna.

Przed trzema laty czasopismo "Scientific American" przepowiadało holograficznym systemom pamięci masowych wielką przyszłość. Wydaje się, że ten moment właśnie nadchodzi. Początkowo jednak na pewno nie będzie to produkt masowy. Szczególnie aktywne są dwie amerykańskie firmy: Aprilis (wydzielona z firmy Polaroid) oraz InPhase (założona przez firmę Lucent przy wsparciu firmy Imation). Nośniki tych firm testowane są obecnie przez wszystkich liczących się producentów systemów pamięci masowych.

Holograficzne techniki pamięci masowych  
Wzór interferencyjny modulacja światła (SLM) Hologram powstaje w wyniku interferencji (nałożenia się) dwóch wiązek światła. Obie powstają najczęściej w wyniku optycznego podziału jednej wiązki z tego samego lasera.

- Advanced Optical Disc (AOD). Pojemność płyty wynosi od 15 do 20 GB. Sanyo również nie pozostaje w tyle - proponuje płyty o pojemności od 25 do 30 GB. Firmy Hitachi i Maxwell idą inną drogą. Proponują płyty składające się maksymalnie z 200 warstw, mogące pomieścić do 1 TB danych. Poszczególne warstwy są przezroczyste. Warstwa aktywna przebarwia się na niebiesko, gdy zostanie do niej przyłożone napięcie. Nośniki wielokrotnego zapisu i odpowiednie napędy powinny się pojawić na rynku w roku 2007.



Rys. 4. Zasada działa w obie strony i pozwala odtworzyć wiązkę sygnałową.

Jedna wiązka, tak zwana sygnałowa, zawiera odwzorowanie obiektu powstałe w wyniku modulacji, natomiast druga, tak zwana referencyjna, składa się ze światła spójnego. Modulacja wiązki sygnałowej za pomocą obrazu lub wzorca bitowego następuje w przestrzennym modulatorze światła (SLM - Spatial Light Modulator). Jest to na ogół struktura ciekłokrystaliczna, podobna do ekranu TFT. Od pewnego czasu stosuje się również znane z projektorów mikrolustra. Powstający trójwymiarowy wzór interferencyjny zapisywany jest na światłoczułym nośniku. W trakcie zapisu zmienia się jeden z parametrów nośnika: przepuszczalność optyczna, współczynnik załamania światła lub grubość warstwy materiału. Nośnikiem jest najczęściej ciało krystaliczne lub błona polimerowa. Odczyt obrazu polega na oświetleniu nośnika spójnym promieniem światła, identycznym z wiązką referencyjną. W ten sposób pierwotny obiekt zostaje ponownie odwzorowany. Za przetwarzanie obrazu odpowiada zwykle matryca detekcyjna w postaci układu CCD.

Holograficzny zapis danych jest utrudniony przez szkodliwe interferencje, występujące również w teleskopach astronomicznych w przestrzeni kosmicznej. Opracowane na ich potrzeby procedury korekcji błędów znalazły zastosowanie w niemal niezmięnionej formie również w holograficznym zapisie danych.

## Wariacje holografii

Wszystkie procesy holograficznego zapisu danych są odwracalne. Gdy wiązka referencyjna do odczytu danych trafi na hologram, powstanie obraz. Oświetlenie hologramu światłem modulowanym daje w efekcie wiązkę referencyjną.

W przypadku oświetlenia obrazu od tyłu wiązką referencyjną powstaje przed modulatorem pierwotny obraz (projekcja tylna). Odzworowanie holograficzne wymaga stosowania drogich, bardzo precyzyjnych soczewek i systemów optycznych. Do odczytu stosuje się projekcję tylną, a ta sama optyka służy zarówno do odczytu, jak i zapisu. Hologram informacji przewidzianej do zapisania można wytworzyć za pomocą luster o zmiennych kątach, fal różnej długości lub za pomocą rozmaitych przesunięć fazowych. Można w ten sposób zapisać na nośniku jednocześnie całe zestawy danych.

Efekt jednoczesnego zapamiętywania wielu obrazów można zaobserwować na przykładzie hologramów na kartach kredytowych - gdy patrzysz na nie pod różnymi kątami, możesz zobaczyć różne obrazy. Szczytowe osiągnięcie w tym zakresie do tej pory to zapis 10 tysięcy obrazów w strukturze o grubości 1 centymetra.

## Media holograficzne

Opierając się na obecnym stanie techniki holograficzne nośniki pamięci o wielkości płyty CD mogłyby pomieścić do około 200 GB przy transferze 20 MB/s. Inaczej niż w przypadku twardego

dysku czy taśmy, zapisywany jest cały zestaw danych (strona), a nie szeregowy strumień bitów. Obecnie wielkość takiego zestawu wynosi około 1 MB, a więc w jednym kroku zapisuje się lub odczytuje 1 MB danych.

Właśnie ta cecha umożliwia uzyskać nie dużej przepływności danych, niezbędnej w operowaniu wielkimi zbiorami danych.

Jedną z większych przeszkód, hamujących rozpowszechnienie się holograficznych pamięci masowych, jest brak odpowiedniego nośnika. Spore nadzieje rokuje szkło z niewielkimi otworkami wypełnionymi akrylem. Szkło jest materiałem bardzo stabilnym.

Większość stosowanych dotychczas polimerów kurczy się podczas obróbki i zniekształca hologram. Szkło wypełnione akrylem kurczy się o mniej niż jeden procent, a więc jest znacznie bardziej stabilne od polimerów. Ponadto szkło może mieć większą grubość, dlatego automatycznie zwiększa się pojemność nośnika.

Najczęściej do tej pory stosowany materiał fotorefrakcyjny to nioban litu ( $\text{LiNbO}_3$ ) z domieszką żelaza. Jest to jednak materiał drogi i bardzo mało odporny; dane są tracone przy wielokrotnym odczycie, a zakres dynamiki jest niewielki. Czynione są próby powstrzymania danych przed zanikaniem podczas odczytu. Stosuje się w tym celu światło lasera o dwóch barwach oraz stechiometryczny, a także wzbogacony o różne domieszki nioban litu (SLM). Materiał jest aktywowany jedną barwą światła, a druga służy do odczytu i zapisu. Materiały polimerowe do jednokrotnego zapisu zmieniają swój współczynnik załamania światła w wyniku nieodwracalnej polimeryzacji. Skład chemiczny i

właściwości optyczne materiału zmieniają się w sposób stały. Przewiduje się, że ich trwałość powinna sięgać 50 lat.

## Zastosowania

W trakcie holograficznego zapisu danych zapisywane są stronicowo całe bloki danych. Każdą stronę można sobie wyobrazić jako kwadratową płytkę, w której wypalono wzór bitowy (wgłębienie-brak wgłębienia). Przy każdej zmianie kąta wiązki referencyjnej powstaje kolejna wirtualna płytkę, zależnie od zmiany kąta przed lub za poprzednią. Każda płytkę odczytywana jest za pomocą spójnej wiązki referencyjnej, padającej pod odpowiednim kątem.

Jeżeli podczas odczytu zostanie zastosowana maska wyszukiwania, można od razu odczytywać określone treści, bez późniejszego porównywania.

Poszukiwane treści, charakteryzujące się wysokim współczynnikiem korelacji, dają bardziej intensywne światło podczas odczytu. To sposób na szybkie i łatwe przeszukiwanie baz danych.

Obecnie nośniki holograficzne to zwykle media jednokrotnego zapisu. Ich obszary zastosowań są podobne do płyt CD i DVD. Dzięki dużej pojemności można na nich zapisać na przykład cały film fabularny w jakości HDTV. Szczególną zaletą jest praca równoległa.

Zwiększenie szybkości transmisji nie wymaga zwiększania szybkości obrotowej. Wzrost pojemności nie wymaga tworzenia coraz mniejszych punktów zapisu. Ed Grochowski i Hans Coufal z centrum badawczego Almaden (IBM) przewidują następującą klasyfikację pamięci holograficznych.

## Produkty i projekty

Jest wiele projektów związanych z pamięciami holograficznymi. Co prawda, nie wszystkie firmy lub grupy robocze, które rozpoczęły prace nad jakimiś rozwiązaniami, przetrwały do tej pory. Niektóre z kolei do tej pory otrzymują spore wsparcie, jak choćby Aprilis, który dostał od jednego tylko inwestora 17 mln na badania i rozwój. InPhase otrzymał ostatnio zlecenie badawcze o wartości 600 tysięcy dolarów od National Technology Alliance, agencji Ministerstwa Obrony Stanów Zjednoczonych. Wcześniej firma pozyskała środki inwestycyjne w wysokości około 8,3 miliona dolarów. Japońska firma Optware otrzymała 4,9 miliona dolarów od grupy inwestorów, w tym Intel.

Przegląd pamięci holograficznych			
Rodzaj	Pojemność	Czas dostępu	Zastosowanie
Holo-DRAM	25 GB	10 $\mu$ s	nieulotna pamięć cache
Dysk holograficzny	1 TB	10 ms	wysoka niezawodność
Holograficzna płyta DVD	1 TB	10 ms	niskie koszty
Archiwum holograficzne	1 PB	10 s	duża gęstość zapisu

Rys. 5. Przegląd pamięci holograficznych

### Aprilis

Opracowany przez Aprilis nośnik jednorazowego zapisu HMD 120 to krążek o średnicy 120 mm, umieszczony między dwiema płytkami szklanymi. Pojemność wynosi 200 GB. Z kolei kwadratowa karta pamięci HMC050 ma wymiary 50x50 mm. Grubość właściwych nośników wynosi 200 lub 300  $\mu$ m.

Całkowita grubość wraz z osłoną wynosi 0,6, 1,2 lub 1,55 mm. Aprilis podaje, że transfer danych sięga 100 MB/s. Zastosowany nośnik CROP (Cationic Ring Opening Polymerization) jest bardzo stabilny geometrycznie, ponadto charakteryzuje się dużą czułością i wysokim współczynnikiem załamania światła przy niewielkim rozproszeniu wiązki. Po zapisie materiał jest odporny na światło i utlenianie. Aprilis zakupił w 2002 roku 21 patentów na techniki holograficzne od firmy Manhattan Scientifics. Ponad 15 firm, w tym tak znane, jak Sony czy Samsung, testuje obecnie płyty i karty oferowane przez Aprilis.

### IBM

IBM zajmuje się pamięciami holograficznymi z różną intensywnością już od ponad 30 lat. Testuje przy tym wszelkie możliwe materiały, które mogłyby wchodzić w grę jako nośniki holograficzne. Na razie inżynierom IBM udało się uzyskać gęstość zapisu 400 b/ $\mu$ m<sup>2</sup>. Dla porównania, gęstość zapisu płyt CD wynosi 0,7 b/ $\mu$ m<sup>2</sup>, zaś płyt DVD -4,5 b/ $\mu$ m<sup>2</sup>. Problem utraty danych przy wielokrotnym odczycie IBM chce rozwiązać za pomocą różnych długości fal światła używanego do zapisu i odczytu.

### InPhase

Nośnik opracowany przez InPhase -Tapestry - ma szczególnie dobre właściwości tworzenia hologramów. Tworzą go dwa składniki chemiczne, dające się polimeryzować niezależnie od siebie. Płytę o wymiarach CD, pojemności 100 GB i transferze 20 MB/s zaprezentowano publicznie w kwietniu 2003 roku. Do chwili zapisu nośnik musi pozostawać w światłoszczelnej obudowie. Komercyjne produkty mają być dostępne w niedalekiej przyszłości. Niezależnie od tego InPhase informuje, że prowadzi testy nośnika wielokrotnego zapisu (do tysiąca razy). Brak informacji o zastosowanych materiałach. Stosowane dotychczas materiały na bazie azobenzenu można zapisywać od 60 do 80 razy. InPhase przejął od Bell Labs 42 patenty na techniki holograficzne, sam zgłosił też około 40 kolejnych. Niektóre zostały już przyznane.

## Optilink

Według własnych informacji, szwedzka firma Optilink pierwsza na świecie opracowała przenośne urządzenie do testowania i oceny pamięci holograficznych, podłączane do peceta. Sam nośnik ma format karty kredytowej. Optilink wykorzystuje polaryzowaną holografię fourierowską; płytka ciekłego kryształu o grubości 2 l'm ma pojemność 1 GB.

Laser pracuje z falą o długości 532 nm i impulsami o długości rzędu pikosekund. Modulację wiązki zapewnia SLM na bazie ciekłego kryształu. Wiązka danych podlega przekształceniom fourierowskim, a następnie, wraz z prostopadłą do niej wiązką referencyjną, tworzy obraz interferencyjny. Optilink preferuje peptydy i ciekłe kryształy. Peptydy to polimery, które pod wpływem światła mogą tworzyć związki z różnymi chromoforami. Peptydy mają wiele bardzo dobrych właściwości optycznych, są bardzo stabilne temperaturowo, a także niedrogie w produkcji. Optilink stosuje światło spolaryzowane liniowo do zapisu, natomiast do jego usuwania - światło spolaryzowane kołowo. Do odczytu i zapisu można używać światła o takiej samej długości fali, ponieważ energia oświetlenia potrzebna do przeorientowania materiału wymaga różnej intensywności. Optilink współpracuje z Riso National Laboratory w Danii oraz z Uniwersytetem Budapeszteńskim.

## Optostor

Niemiecka firma Optostor z Ratingen we współpracy z Instytutem Krystalografii Uniwersytetu w Kolonii postawiła na kryształy litu. Obecnie największe z nich mają wymiary mniej więcej 50x50x3 mm, są przy tym wytrzymałe mechanicznie i odporne chemicznie. Zastosowany nioban litu musi zostać utrwalony w kryształach po zapisie. Część z około 20 zgłoszonych patentów dotyczy właśnie tego procesu, którego szczegóły nie zostały opublikowane. Optostor przewidywał, że trwałość nośnika sięgnie 500 lat. Niestety, sama firma okazała się znacznie mniej trwała i w grudniu 2002 roku ogłosiła upadłość. Zabrakło milionów dolarów, potrzebnych na opracowanie handlowego produktu. Takie sumy łatwiej znaleźć w Stanach Zjednoczonych lub w Japonii. Wyniki badań wykorzystują inne firmy.

## Optware

Japońska firma Optware współpracuje z amerykańskimi uczelniami-Uniwersytetem Stanforda i MIT. Środki inwestycyjne są również amerykańskie. Celem jest wyprodukowanie nośnika o pojemności 1 TB i transferze 1 GB/s.

Oprócz tego Optware produkuje tzw. Holographic Media Analyzer (S-VRD) - urządzenie do analizy mediów holograficznych.

## Perspektywy

Holograficzne przechowywanie danych to teoretycznie prosta technika, znana w dodatku od wielu lat. Okazuje się jednak, że opracowanie powszechnie dostępnych produktów jest nadzwyczaj trudne. Szczególne wyzwanie stanowi opracowanie samego nośnika. Przed zapisem (naświetleniem) nośnik musi być przechowywany w światłoszczelnym opakowaniu - jak błona fotograficzna. Przed ponownym zapisem trzeba przywrócić mu światłoczułość. Nośników nie można tłoczyć jak płyt CD czy DVD. Utrudnia to ich masowe powielanie. Płyty DVD z materiałem holograficznym mają mieścić około 1 TB danych, ale pojawią się na rynku dopiero za trzy do pięciu lat. Nośniki oparte na niebieskim laserze, ale nie w technologii holograficznej, na przykład płyty DVD o pojemności 30 GB, powinny za to pojawić się już niebawem. Według opinii producentów i ekspertów, nośniki holograficzne nie zastąpią w przyszłości tradycyjnych - taśm, twardych dysków i magnetoptycznych, DVD. Nowa technika może wyprzeć tradycyjną jedynie w bardzo specjalistycznych zastosowaniach.

Autor - Herman Strass