

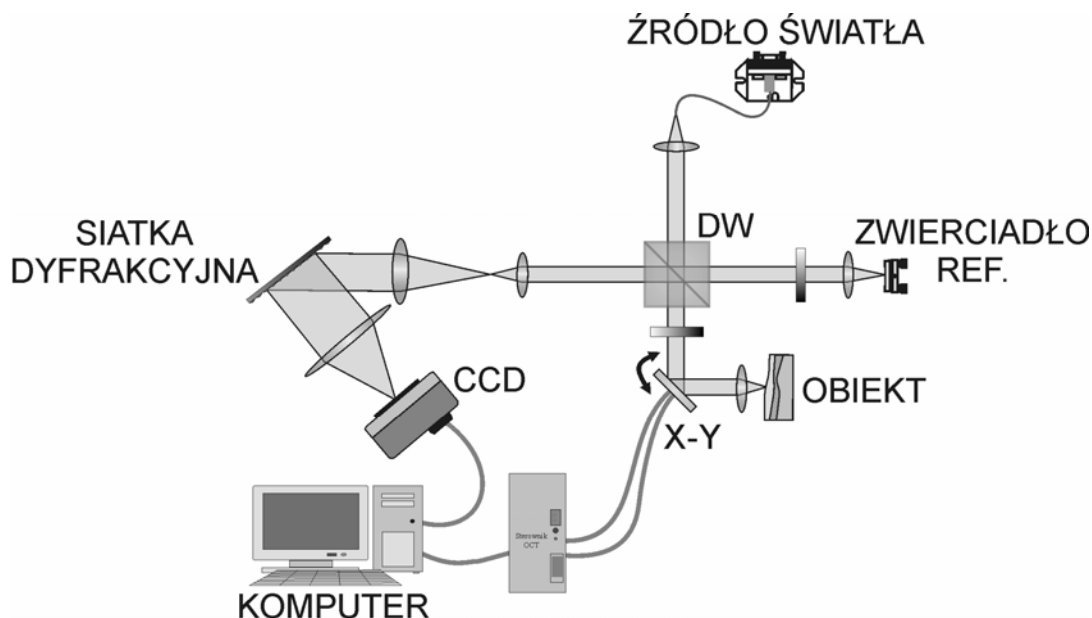
Tomografia optyczna

Piotr Targowski^a, Michalina Góra^a, Bogumiła Rouba^b, Magdalena Targowska^b

^aInstytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, ptarg@phys.uni.torun.pl

^bInstytut Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Optyczna tomografia z zastosowaniem interferometrii światła częściowo spójnego (ang. Optical Coherence Tomography, OCT) jest nowoczesną techniką otrzymywania obrazów przekroju obiektu, polegającą na wydobyciu informacji niesionej przez światło rozproszone w kierunku wstecznym na nieciągłościach struktury tego obiektu. Metoda jest całkowicie bezkontaktowa i z uwagi na moc stosowanego światła mniejszą niż kilka miliwatów, całkowicie nieinwazyjna. Może więc być stosowana wielokrotnie i w wielu miejscach obiektu.



Rys.1. Schemat układu pomiarowego do Spektralnej Optycznej Tomografii z zastosowaniem światła częściowo spójnego (SOCT). DW – dzielnik wiązki, X-Y – skaner galwanometryczny, CCD – liniowa kamera CCD.

We wszystkich urządzeniach OCT wykorzystuje się specyficzne źródła światła o dużej spójności przestrzennej (jest ona wymagana przede wszystkim dla uzyskania dużej czułości urządzenia) i o widmie charakteryzującym się znaczną szerokością spektralną. Ta ostatnia właściwość wymagana jest dla uzyskania odpowiedniej zdolności rozdzielczej w głąb badanego obiektu. Najczęściej jako źródła światła wykorzystuje się diody superluminescencyjne, albo, w droższych rozwiązaniach, lasery o specjalnej konstrukcji. W urządzeniu skonstruowanym dla potrzeb badań konserwatorskich w Instytucie Fizyki UMK (Rys. 1), światło z takiej diody ($\lambda_{\text{centr}} = 835 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$) kierowane jest za pomocą światłowodu do kolimatora, który wprowadza je do interferometru Michelsona. Jedno z ramion interferometru jest zamknięte przez nieruchome zwierciadło referencyjne, w drugim umieszczony jest skaner zwierciadłany (X-Y), kierujący światło przez obiektyw ku badanemu obiektowi. Światło rozproszone na elementach struktury obiektu powraca tą samą drogą i w dzielniku wiązki (DW) interferuje ze światłem powracającym z ramienia referencyjnego. Z uwagi na sposób, w jaki informacja o wewnętrznej budowie badanego obiektu jest

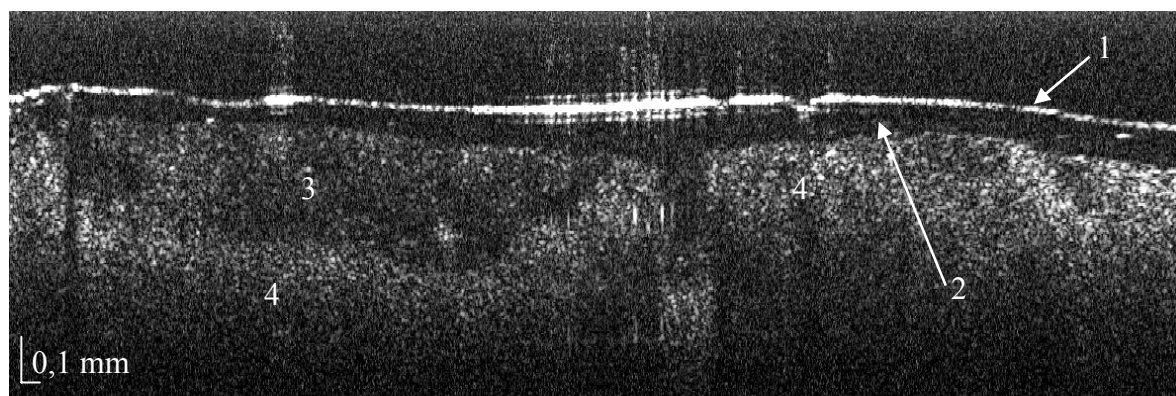
otrzymywana z analizy sygnału interferencyjnego wyróżnia się dwie zasadnicze odmiany urządzeń OCT: czasową (opracowaną jako pierwsza) i spektralną (do tego typu urządzeń należy układ przedstawiony na rysunku). W drugim przypadku sygnał jest analizowany w spektrografie wykorzystującym siatkę dyfrakcyjną, a uzyskane widmo przesyłane jest z kamery CCD do komputera, gdzie poddawane jest szybkiej transformacji Fouriera. Metoda spektralna wyróżnia się dużą szybkością działania i dużą czułością. Opis właściwości wszelkich odmian urządzeń OCT jest szeroko dostępny w literaturze przedmiotu w języku angielskim (obszerne zestawienie zawiera na przykład artykuł Tomlinsa i Wanga¹). Wśród publikacji w języku polskim należy wskazać na artykuł Kowalczyka i Wojtkowskiego.²

Opisana powyżej analiza zarejestrowanego światła umożliwia wyznaczenie położenia kolejnych warstw struktury wzdłuż wąskiej wiązki światła sondującej obiekt. Tak uzyskana jedna linia obrazu przekroju nazywa się, analogicznie jak w ultrasonografii, A-skanem. Kompletny obraz przekroju (B-skan) otrzymuje się po wielokrotnym powtórzeniu pomiaru wzdłuż wiązki przesuwanej prostopadłe do kierunku padania światła.

Podstawowym zastosowaniem OCT pozostaje od ponad dziesięciu lat diagnostyka okulistyczna.³ Jest to metoda dobrze ugruntowana, w sprzedaży dostępne są odpowiednie urządzenia (w cenie ok. 200 000 PLN).

Z uwagi na to, że metoda jest całkowicie nieinwazyjna i nie wymaga specjalnego przygotowania obiektu do badań, od kilku lat trwają próby jej adaptacji do badania struktury i właściwości obiektów zabytkowych. Pierwsze w świecie, według naszej wiedzy, doniesienie o użyciu OCT do badania malowideł na płótnie ukazało się w języku polskim, w 2002 roku.⁴ Późniejsze publikacje, o szerszym zasięgu, systematycznie powiększają ten obszar zastosowań.^{5,6}

Z uwagi na własności dostępnych źródeł światła w badaniach zazwyczaj stosuje się promieniowanie z zakresu bliskiej podczerwieni (od ok. 0,8 μm do 1,5 μm). Tym samym istotnym ograniczeniem w wykorzystaniu tej metody jest stopień przejrzystości badanego ośrodka w tym zakresie widmowym. Z tego powodu najbardziej oczywistym zastosowaniem OCT w badaniach obiektów zabytkowych jest analiza grubości i struktury warstw przezroczystych i częściowo przezroczystych, na przykład werniksu na malowidłach albo warstwy malarskiej złożonej z określonych pigmentów (Rys. 2). Ograniczenia dotyczące przezroczystości obiektu nie mają zastosowania w przypadku wykorzystania OCT do odwzorowania kształtu powierzchni badanego zabytku. Osiągane obecnie rozdzielczości obrazowania są rzędu 5 μm w głąb obiektu i 15 μm w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku padania wiązki sondującej.

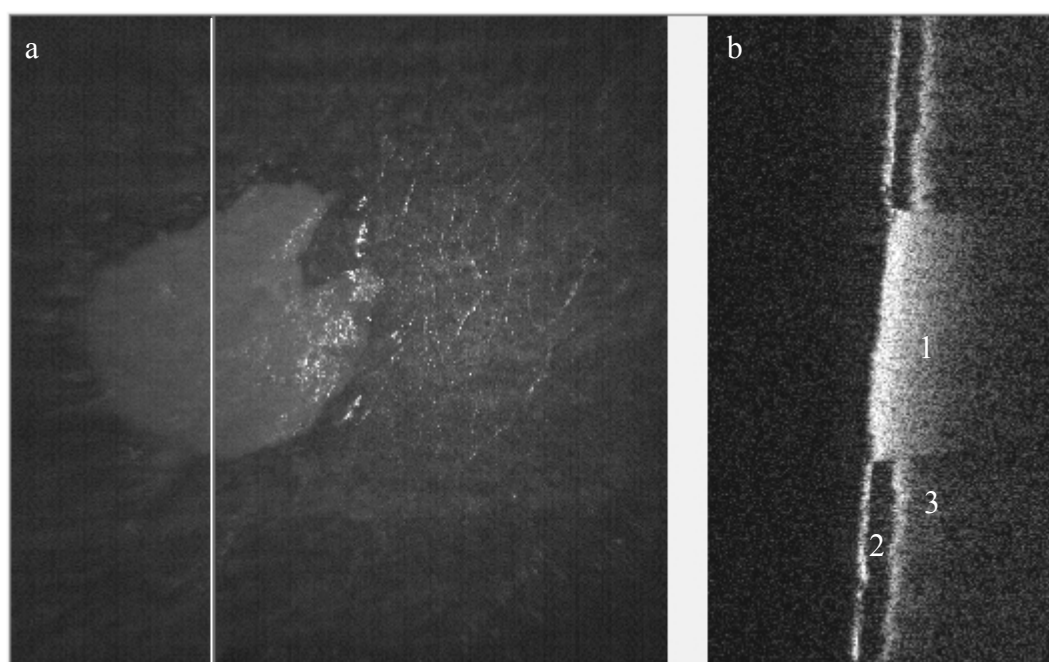


Rys. 2. Tomogram OCT przedstawiający stratygrafię malowidła olejnego: 1 – powierzchnia obrazu, 2 – warstwa werniksu, 3 – laserunki, 4 – warstwa malarska nieprzezroczysta dla promieniowania sondującego. Skala pionowa obliczona dla średniego współczynnika załamania światła 1,5.

Systematyczne badania⁷ przepuszczalności różnych pigmentów dla promieniowania wykorzystywanego w OCT wskazują, że przede wszystkim barwniki czerwone, laserunkowe są dostatecznie przezroczyste w żądanym przedziale widmowym. Wydaje się więc, że wykorzystanie OCT do stratygrafii warstwy malarskiej możliwe jest, jak na razie, w ograniczonym zakresie. Istotny postęp może przynieść tu rozwinięcie metod opartych o wykorzystanie promieniowania podczerwonego o długości fali kilku mikrometrów. Wymagać to jednak będzie opracowania nowych źródeł światła koherentnego o ekstremalnie dużej szerokości spektralnej oraz być może również nowych detektorów.

Obecnie na plan pierwszy wysuwają się więc inne zastosowania, przede wszystkim związane z obrazowaniem warstwy werniksu. Poprzez bezpośrednie porównanie z fotografią przekroju próbki pobranej w miejscu badania za pomocą OCT wykazano doskonałą zgodność obrazowania za pomocą obu metod.⁸

Kolejnym przykładem obrazowania warstwy werniksu jest tomogram przedstawiony na rysunku 3b, gdzie prezentowany jest przekrój przez ubytek werniksu i warstwy malarskiej uzupełniony kitem, założonym częściowo w objętości nie usuwanego w trakcie konserwacji werniksu.



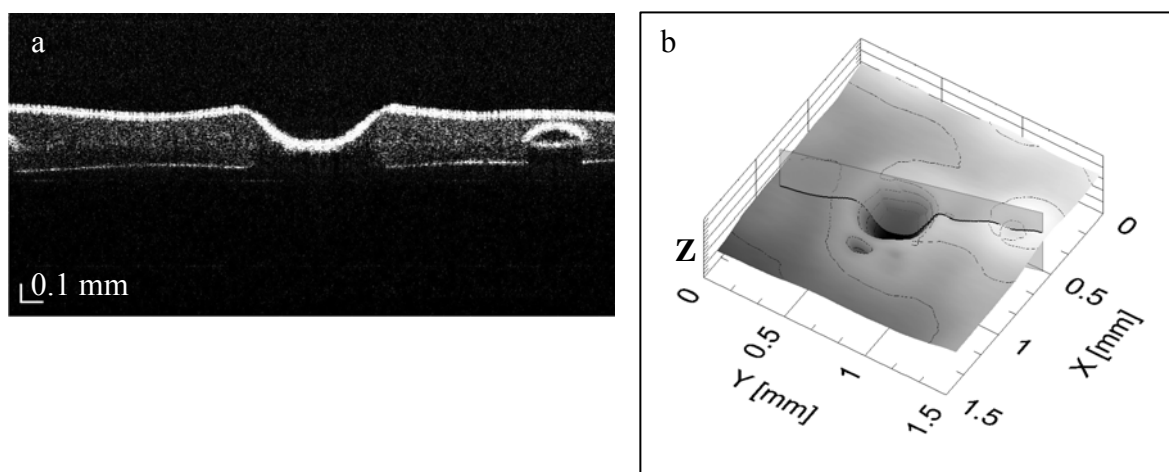
Rys. 3. Tomogram OCT (b) ukazujący przekrój przez uzupełnienie kitem ubytku w obrębie warstwy malarskiej i werniksu: 1 – kit, 2 – werniks oryginalny, 3 – oryginalna warstwa malarska. Z lewej (a) widok lica obrazu (fragment) w miejscu ubytku uzupełnionego kitem. Miejsce obrazowania przekroju oznaczono białą linią.

Ponieważ metoda spektralnego OCT jest bardzo szybka, można łatwo zarejestrować wiele kolejnych, równoległych przekrojów. Składając je razem uzyskuje się pełną informację o trójwymiarowej strukturze wybranego fragmentu (kostki) obiektu. Dane te można dalej przetwarzać, na przykład w celu otrzymania mapy grubości werniksu.^{9,10}

Następnym krokiem w zakresie wykorzystania OCT do badania werniksów może być próba użycia tej techniki podczas procesu usuwania werniksu w trakcie konserwacji obiektu. Szczególnie w przypadku laserowej ablacji werniksu¹¹ niezbędne jest bieżące śledzenie tego procesu. Jak dotąd jedyną metodą pozwalającą na taką kontrolę była analiza widma fluorescencji plazmy wytwarzanej w procesie ablacji (LIBS) i poszukiwanie w nim śladów pierwiastków wchodzących w skład warstwy malarskiej. Metoda ta jest dobrze ugruntowana i

charakteryzuje się dużą czułością. Jest ona obarczona jednak „systemową” wadą – proces ablacji werniksu przerywany jest dopiero, kiedy pewnemu naruszeniu ulega już warstwa malarska leżąca pod nim. Metoda LIBS jest z tego samego powodu również nieprzydatna, jeżeli planuje się jedynie częściowe usunięcie werniksu.

Ponieważ OCT umożliwia szybką wizualizację warstwy werniksu, zastosowanie tej metody do kontroli procesu ablacji laserowej wydaje się jedynie kwestią czasu. Podjęliśmy takie badania w naszym zespole we współpracy z Instytutem Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Jak dotąd opracowano metodę wizualizacji kraterów ablacyjnych i oceny ich rozmiarów (Rys. 4).

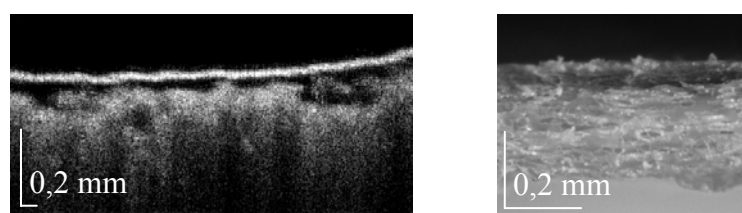


Rys. 4 a: Tomogram OCT krateru ablacyjnego w warstwie żywicy poliuretanowej; b: profilometria powierzchni żywicy z widocznym kraterem (skala Z obejmuje zakres 0.4 mm).

Interesującym wyzyskaniem przezroczystości niektórych pigmentów w podczerwieni w powiązaniu z niską spójnością czasową używanego promieniowania jest zastosowanie OCT do wizualizacji rysunku znajdującego się pod warstwą malarską. W stosunku do znanych metod, nie wykorzystujących zjawiska interferencji, uzyskiwane obrazy mają znacznie lepszy kontrast.⁶

W przypadku, gdy obiektem zainteresowania jest jedynie odwzorowanie powierzchni zabytku (jak na Rys. 4b), ograniczenia związane z absorpcją stosowanego promieniowania nie występują. Z uwagi na to, że metoda jest szybka i bezdotykowa, można ją wykorzystać do analizy wpływu zmian środowiska (jak temperatura i wilgotność) na strukturę malowidła. Obiekt umieszcza się wówczas w specjalnej komorze klimatycznej. Uzyskane wyniki pozwalają śledzić zakres odkształceń powierzchni malowidła, na przykład w obrębie spękania warstwy malarskiej, pod wpływem gwałtownej zmiany parametrów środowiska.¹²

Tomografia Optyczna może być z powodzeniem użyta do analizy również innych niż malowidła obiektów. Jednym z pierwszych tego rodzaju zastosowań była wizualizacja i pomiar grubości warstwy glazury na porcelanie.^{4,5}



Rys. 5. Tomogram OCT i fotografia przekroju (foto Z. Rozlucka) próbki pergaminu.

Innym, mającym jak się wydaje, interesujące perspektywy zastosowaniem jest wykorzystanie OCT do uzyskiwania obrazów przekroju pergaminu (Rys. 5), z zamiarem bezinwazyjnego śledzenia procesów jego destrukcji pod wpływem atramentów żelazowo-galusowych (atrament ten jest przezroczysty dla promieniowania podczerwonego).

Podsumowując ten krótki przegląd obecnych i potencjalnych zastosowań OCT do diagnostyki i dokumentacji obiektów zabytkowych należy podkreślić, że na obecnym etapie rozwoju metody nadal trwają poszukiwania tematyki, w której znajdzie ona najlepsze zastosowanie. Wydaje się, że rola fizyka w tym zakresie powoli się wyczerpuje – dalszy znaczący postęp będzie możliwy, jeżeli prezentowana metoda spotka się z zainteresowaniem środowiska konserwatorów dzieł sztuki. Tylko osoby bezpośrednio zaangażowane w badanie zabytku są w stanie zadać rzeczywiście ważne dla zrozumienia struktury i własności obiektu pytania, na które stara się odpowiedzieć fizyk konstruujący nowe narzędzie diagnostyczne.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003-2006 jako projekt badawczy 2H01E 025 25.

Literatura:

- [1] P.H. Tomlins and R.K. Wang, „Theory, developments and applications of optical coherence Tomography” *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** (2005) 2519–2535
- [2] A. Kowalczyk i M. Wojtkowski, „Tomografia optyczna”, *Postępy Fizyki* **53D** (2002) 172-175.
- [3] J.S. Schuman, C.A. Puliafito and J.G. Fujimoto, *Optical Coherence Tomography of Ocular Diseases*, 2nd ed., Slack Inc, Thorofare, NJ, USA, 2004.
- [4] P. Targowski, B. Rouba, M. Wojtkowski, I. Gorczyńska, A. Kowalczyk, „Zastosowanie optycznej tomografii do nieinwazyjnego badania obiektów zabytkowych”, *Ars longa – vita brevis, Tradycyjne i nowoczesne metody badania dzieł sztuki*; Sesja naukowa poświęcona pamięci prof. Z. Borchwicza, ed. J. Flik, Wydawnictwo UMK, Toruń 2003, 121 - 129.
- [5] P. Targowski B. Rouba, M. Wojtkowski, A. Kowalczyk, „Application of optical coherence tomography to non-destructive examination of museum objects”, *Studies in Conservation* **49**, (2004) 107 - 114.
- [6] H. Liang, M. G. Cid, R. G. Cucu, G. M. Dobre, A. G. Podoleanu, J. Pedro, and D. Saunders, *Opt. Express* **13** (2005) 6133-6144.
- [7] A. Szkulmowska, M. Góra, M. Targowska, B. Rouba, D. Stifter, E. Breuer, P. Targowski, „Zastosowanie tomografii optycznej do badania stratygrafii obrazów olejnych” – *tym tomie*
- [8] T. Arecchi, M. Bellini, C. Corsi, R. Fontana, M. Materazzi, L. Pezzati, A. Tortora, „Optical coherence tomography for painting diagnostics” *Proc. of SPIE* **5857** (2005) 278-282.
- [9] P. Targowski, T. Bajraszewski, M. Góra, A. Szkulmowska, M. Szkulmowski, M. Wojtkowski, J.J. Kaluzny, B.J. Kaluzny, A. Kowalczyk, Spectral Optical Coherence Tomography for Nondestructive Examinations, *Optica Applicata* (2006) *w druku*
- [10] I. Gorczyńska, M. Wojtkowski, M. Szkulmowski, T. Bajraszewski, B. Rouba, A. Kowalczyk, P. Targowski, „Varnish Thickness Determination by Spectral Optical Coherence Tomography”, *Materiały konferencji LACONA VI*, ed. J. Nimrichter, Wiedeń 2006, *w druku*
- [11] Final Report CRAFT project ENV4-CT98-0787 “Advanced workstation for controlled laser cleaning of artworks” <http://www.art-innovation.nl/>
- [12] T. Bajraszewski, I. Gorczyńska, B. Rouba, P. Targowski, „Spectral domain Optical Coherence Tomography as the Profilometric Tool for Examination of the Environmental Influence on Paintings on Canvas”, *Materiały konferencji LACONA VI*, ed. J. Nimrichter, Wiedeń 2006, *w druku*