

**Jerzy PLUCIŃSKI, Marcin STRĄKOWSKI**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, KATEDRA OPTOELEKTRONIKI I SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH

## Optyczna interferometria niskokoherentna w diagnostyce powłok ochronnych

Dr inż. Jerzy PLUCIŃSKI

Adiunkt w Katedrze Optoelektroniki i Systemów Elektronicznych Politechniki Gdańskiej. Tytuł magistra inżyniera uzyskał w 1984, a doktora w 1994 roku w tej samej uczelni. W latach 1996-2003 pracował naukowo z przerwami (łącznie 28 miesięcy) w Uniwersytecie w Oulu w Finlandii. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się głównie optyką materiałów silnie rozpraszających, interferometrią niskokoherentną i sensorami światłowodowymi. Autor lub współautor ponad 100 prac naukowych.

e-mail: [pluc@eti.pg.gda.pl](mailto:pluc@eti.pg.gda.pl)



Mgr inż. Marcin STRĄKOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej (2002). Obecnie realizuje pracę doktorską p.t. „Analiza stanu polaryzacji światła w układach optycznej tomografii koherentnej dla badań struktury materiałów optoelektronicznych i mikroelektronicznych”. Jego zainteresowania obejmują dyscypliny z dziedziny elektroniki i optoelektroniki, w szczególności interferometrii niskokoherentnej. Jest autorem lub współautorem 12 artykułów w czasopiśmie recenzowanych.

e-mail: [m.strakowski@eti.pg.gda.pl](mailto:m.strakowski@eti.pg.gda.pl)



### Streszczenie

W artykule zaproponowano zastosowanie optycznej interferometrii niskokoherentnej w diagnostyce powłok ochronnych. W badaniach wykorzystano optyczny tomograf koherencyjny wykorzystujący interferometr w konfiguracji Michelsona. W układzie pomiarowym użyto podczerwone źródło promieniowania o krótkiej drodze koherencji, którym był światłowodowy fotoniczny pobudzany laserem femtosekundowym. Zastosowano detekcję zrównoważoną niewrażliwą na zmiany polaryzacji przez badany obiekt. Przedstawione wyniki pomiarów pokazały, że można tą techniką diagnozować powłoki ochronne bazujące na farbie zawierającej silnie rozpraszające lub absorbujące pigmenty.

**Słowa kluczowe:** optyczna interferometria niskokoherentna, optyczna tomografia koherentna, powłoka ochronna.

### Optical low-coherent interferometry for diagnosis of protective layers

#### Abstract

In this paper, the use of optical low-coherent interferometry for diagnosis of protective layer is proposed. We have used an optical coherent tomography (OCT) system which was based on Michelson interferometer. During our research, a super-continuum infrared light source based on photonic crystal fiber stimulated by a femtosecond erbium-doped laser was used. Balanced and polarization-sensitive detection was employed. Obtained measurement results demonstrate the ability of our system to diagnose high scattering or absorbing protective paint layers by the OCT system.

**Keywords:** low-coherent interferometry, optical coherent tomography, protective layer.

### 1. Wprowadzenie

Optyczna interferometria niskokoherentna (zwana czasami interferometrią światła białego) jest młodą, dynamicznie rozwijającą się dziedziną fizyki i techniki. Bazuje ona na wykorzystaniu interferencji promieniowania optycznego pochodzącego ze źródła o krótkiej drodze koherencji. Dzięki temu (w przeciwieństwie do interferometrii klasycznej bazującej na źródłach o długiej drodze koherencji) pozwala na absolutny pomiar różnicy długości dróg optycznych między dwoma ramionami wykorzystywanego interferometru (to jest między ramieniem pomiarowym i ramieniem odniesienia). Najczęściej wykorzystywane są tu interferometry w konfiguracji Michelsona lub Mach-Zehndera.

Głównymi obszarami optycznej interferometrii niskokoherentnej są sensory światłowodowe i optyczna reflektometria niskokoherentna (ang. optical low-coherent reflektometry – OLCR). Połączenie jednoczesnego skanowania badanego obiektu w kierunku poprzecznym do kierunku propagacji światła za pomocą mechanicznych stolików przesuwanych lub układów goniometrycznych

z jednoczesnym wykorzystaniem OLCR, pozwalającej na skanowanie wzdłuż propagacji światła, umożliwia realizację optycznej tomografii koherentnej (ang. optical coherent tomography – OCT). Tomografia ta pozwala na dwu- lub trójwymiarowe obrazowanie obiektu.

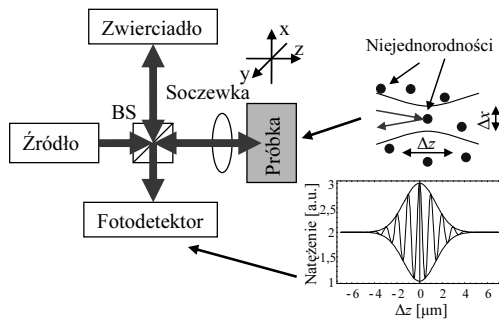
Początki praktycznego wykorzystania interferometrii niskokoherentnej sięgają roku 1972, w którym opisano prototyp interferometru wykorzystującego światło białe do pomiaru grubości [1]. Pierwsze doniesienia na temat obrazowania dwu- i trójwymiarowego z wykorzystaniem reflektometrii niskokoherentnej pojawiły się w roku 1991 [2]. W ciągu następnej dekady OCT bazującej na reflektometrii niskokoherentnej znalazła szereg zastosowań w medycynie, zwłaszcza w okulistyce [3]. Jak dotąd pojawiło się niewiele prac wykorzystania OCT w badaniach materiałów niebiologicznych (np. ceramik [4, 5], polimerów [6, 7], materiałów kompozytowych [8, 9], papieru [10], światłowodów [11] i elementów mikromechanicznych [6, 9]), jeszcze mniej w badaniach powierzchni pokrytych farbą [12-15]. Celem pracy było zbadanie możliwości wykorzystania interferometrii niskokoherentnej w diagnostyce powłok ochronnych wykorzystujących farby, w tym farby zawierające pigmenty utrudniające penetrację promieniowania optycznego w głąb powłoki.

### 2. Zasada działania interferometru niskokoherentnego i układu OCT

Zasadę działania układu do obrazowania dwu- lub trójwymiarowego z wykorzystaniem interferometrii niskokoherentnej łatwo zrozumieć analizując pracę interferometru Michelsona, w którym wykorzystano źródło o krótkiej drodze koherencji (rys. 1). Wiązka promieniowania optycznego z tego źródła jest dzielona za pomocą optycznego dzielnika na dwie wiązki kierowane do dwóch osobnych torów optycznych tworzących dwa ramiona interferometru: pomiarowego, w którym znajduje się badany obiekt, i odniesienia, na końcu którego znajduje się zwierciadło. Promieniowanie optyczne wstecznie rozproszone (lub odbite) w badanym ośrodku razem z promieniowaniem odbitym od zwierciadła w torze odniesienia jest ponownie kierowane w kierunku optycznego dzielnika i dalej w kierunku fotodetektorów. Jeżeli wiązki promieniowania optycznego pochodzące z obu ramion interferometru będą miały zgodną polaryzację i różnica dróg optycznych  $\Delta l$ , jakie pokonało promieniowanie optyczne obu wiązek w ramionach interferometru, będzie mniejsze od drogi koherencji źródła  $L_c$ , wówczas fotodetektor zarejestruje prążki interferencyjne. Sygnał z tych prążków wraz sygnałem optycznym powstałym w wyniku wstecznego rozpraszania promieniowania optycznego w tych miejscach badanego obiektu, dla których różnica dróg optycznych jest większa od drogi koherencji, spowoduje, że przez fotodetektor popłynię prąd, który można zapisać jako [16, 17]:

$$I_d = \rho(P_x + P_r + P_m + 2\sqrt{P_r P_m} |\gamma(\Delta l/c)| \cos(k_0 \Delta l + \alpha)), \quad (1)$$

gdzie:  $\rho$  – czułość fotodetektora,  $P_r$  – moc promieniowania optycznego padającego na fotodetektor pochodzącego z ramienia odniesienia interferometru,  $P_m$  – moc promieniowania optycznego padającego na fotodetektor pochodzącego z ramienia pomiarowego interferometru z miejsca, dla którego  $|\Delta l| \leq L_c$ ,  $P_x$  – moc promieniowania optycznego padającego na fotodetektor pochodzącego z ramienia pomiarowego interferometru z miejsca, dla którego  $|\Delta l| > L_c$ ,  $k_0$  – liczba falowa środkowej długości fali źródła,  $\gamma(\Delta l/c)$  – zespolony stopień koherencji sygnału źródła,  $\alpha$  – różnica faz sygnałów z ramion interferometru dla  $\Delta l=0$ ,  $c$  – prędkość światła w próżni.



Rys. 1. Zasada działania interferometru niskokoherentnego  
Fig. 1. Principle of operation of a low-coherent interferometer

Jednym z najistotniejszych parametrów interferometru niskokoherentnego jest jego podłużna zdolność rozdzielcza  $\Delta z$  [3]:

$$\Delta z \cong \frac{\kappa}{2n_g} \cdot L_c, \quad (2)$$

gdzie:  $n_g$  – grupowy współczynnik załamania testowanego ośrodka,  $\kappa$  – współczynnik zależny od kształtu charakterystyki widmowej (np.  $\kappa=0,44$  dla źródła o charakterystyce lorentzowskiej,  $\kappa=0,88$  dla źródła o charakterystyce gaussowskiej i  $\kappa=1,22$  dla źródła o charakterystyce prostokątnej).

W praktycznych realizacjach interferometru niskokoherentnego zwierciadło w ramieniu odniesienia jest zazwyczaj przesuwane ze stałą prędkością  $v_m$ . W takim wypadku prążki interferencyjne pojawiają się z częstotliwością  $f_D$ , równej różnicy częstotliwości optycznej źródła światła i częstotliwości tego źródła zmienionej o wartość wynikającą z efektu Dopplera:

$$f_D = \frac{2v_m}{\lambda_0}, \quad (3)$$

gdzie  $\lambda_0$  – średnia długość fali.

Jest to użyteczna metoda pomiarowa, pozwalająca na separację sygnału interferencyjnego od sygnałów pochodzących z tych miejsc, dla których nie zachodzi interferencja (to jest, gdy różnica dróg optycznych jest większa niż długość drogi koherencji  $L_c$ ).

Jak już wspomniano, połączenie interferometru niskokoherentnego z możliwością skanowania badanego obiektu w kierunku poprzecznym umożliwia budowę koherentnego tomografu optycznego. W takim układzie wiązka promieniowania optycznego w ramieniu pomiarowym jest skupiana w badanym obiekcie za pomocą soczewki. Największą poprzeczną zdolność rozdzielczą  $\Delta x$  tomografu uzyskamy, gdy zerową różnicę dróg optycznych między ramieniem pomiarowym a odniesienia uzyskamy dla punktów leżących w przewężeniu wiązki za soczewką. Jeżeli badany obszar leży na powierzchni badanego obiektu, to zdolność ta wynosi [3]:

$$\Delta x = \frac{4 \cdot \lambda_0}{\pi \cdot NA}, \quad (4)$$

gdzie NA – apertura numeryczna soczewki.

Wewnątrz próbki poprzeczna zdolność rozdzielcza może być lepsza ze względu na skrócenie fali  $n_t$ -krotnie, gdzie  $n_t$  jest fazowym współczynnikiem załamania światła. Jednak w realnych warunkach pomiarowych poprzeczna zdolność rozdzielcza może być gorsza niż zdolność dana wzorem (4), przy uwzględnieniu  $n_t$ , ze względu na zjawiska związane z przechodzeniem wiązki światła z powietrza do próbki przy nierównej powierzchni granicznej powietrze-próbka (wiązka na tej powierzchni może ulec nieregularnemu załamaniu lub dyfrakcyjnemu ugięciu). Pełna analiza tych zjawisk nie będzie tutaj omawiana.

Należy zwrócić uwagę, że adaptacja przedstawionej powyżej metody do diagnostyki warstw antykorozyjnych wymaga wzięcia pod uwagę następujących problemów, jakie mogą się pojawić w czasie pomiarów:

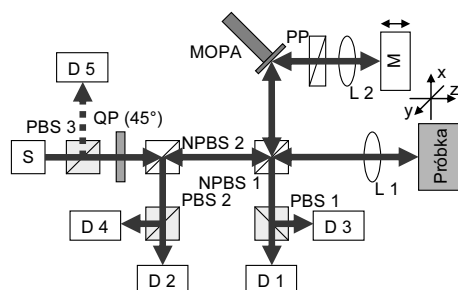
1. występowanie silnej absorpcji lub silnego rozpraszania przez pigmenty występujące w farbach mogą spowodować znaczne osłabienie sygnału interferencyjnego przy jednoczesnym wzroście poziomu sygnału optycznego nie będącego wynikiem interferencji,
2. stan polaryzacji wiązki wstecznie rozpraszanej, na skutek zjawiska elastoptycznego, może ulec zmianie, co może prowadzić do zaniku sygnału interferencyjnego, jeżeli wiązki promieniowania optycznego pochodzące z obu ramion interferometru staną się ortogonalne,
3. inny współczynnik załamania powłok ochronnych niż powietrza może wymagać w czasie pomiarów jednoczesnej zmiany zarówno drogi optycznej ramienia pomiarowego, jak i ramienia odniesienia, tak aby różnica dróg optycznych obu ramion wypadła w miejscu, w którym występuje przewężenie wiązki optycznej,
4. badany ośrodek może wykazywać dyspersję, która może znacznie obniżyć podłużną zdolność rozdzielczą układu,
5. szumy źródła światła mogą w znacznym stopniu zmniejszyć stosunek sygnału użytecznego (to jest pochodzącego z interferencji sygnałów z ramion pomiarowego i odniesienia) do szumów.

Opracowany układ pomiarowy, opisany w następnym punkcie, w większości rozwiązuje powyższe problemy.

### 3. Układ pomiarowy

Schemat układu pomiarowego wykorzystanego przy diagnostyce powłok ochronnych pokazano na rys. 2. Wykorzystuje on interferometr niskokoherentny pracujący w konfiguracji Michelsona. W układzie tym promieniowanie optyczne ze źródła S kierowane jest przez niepolaryzacyjny dzielnik wiązki NPBS 1 do dwóch ramion interferometru: pomiarowego, w którym znajduje się badana próbka, oraz odniesienia z ruchomym zwierciadłem M. Polaryzacyjny dzielnik wiązki PBS 3 pełniący funkcję polaryzatora i ćwierćfalówka QP pozwalają na skanowanie badanego obiektu wiązką promieniowania o polaryzacji kołowej. Polaryzacyjny dzielnik wiązki PBS 1 kieruje interferujące wiązki o wzajemnie ortogonalnych stanach polaryzacji światła do fotodetektorów D 1 i D 3. Pomiar natężenia promieniowania dla dwóch ortogonalnych stanów polaryzacji pozwala na uniezależnienie się od zmian stanu polaryzacji promieniowania w badanym obiekcie powstałych w wyniku na przykład zjawiska elastoptycznego, gdy w badanej warstwie istnieją naprężenia (mogą one powstać w wyniku zgięcia materiału, na którym znajduje się powłoka ochronna). Podczas obróbki sygnału pomiarowego sumowane są natężenia sygnałów

koherentnych rejestrowanych przez te fotodetektory, przez co uzyskuje się kontrast obrazowania niezależny od zmian stanu polaryzacji promieniowania w badanym obiekcie. W systemie wykorzystano detekcję zrównoważoną. Takie rozwiązanie pozwala na bardzo dużą redukcję szumów nadmiarowych wnoszonych przez źródło promieniowania [18]. Ze względu na detekcję sygnału z podziałem stanów polaryzacji, zastosowano dwa układy takiej detekcji (Model 2017 Nirvana firmy New Focus, USA): jeden wykorzystuje fotodetektory D 1 i D 2, a drugi D 3 i D 4. Układy te pozwalają na redukcję tych szumów o 50 dB. Do detektorów D 2 i D 4, wykorzystywanych przy detekcji zrównoważonej, sygnał optyczny kierowany jest przez niepolaryzacyjny dzielnik wiązki NPBS 2 i polaryzacyjny dzielnik wiązki PBS 2. Fotodetektor D 5 służy do regulacji polaryzacji źródła, tak aby uzyskać maksymalną moc pobudzenia badanej próbki.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego: S – źródło, D 1-5 – fotodetektory, M – zwierciadło, MOPA – zwierciadło na elemencie piezoelektrycznym, L 1-2 – soczewki, NPBS 1-3 – niepolaryzacyjne dzielniki wiązki, PBS 1-3 – polaryzacyjne dzielniki wiązki, QP (45°) – ćwierćfalówka, PP – element kompensujący dyspersję badanej próbki.

Fig. 2. Measurement setup: S – source, D 1-5 – photodetectors, M – mirror, MOPA – mirror on piezo actuator, L 1-2 – lenses, NPBS 1-3 – non-polarization beamsplitters, PBS 1-3 – polarization beamsplitters, QP (45°) – quarter-wave plates, PP – dispersion compensation prisms

Skanowanie badanej próbki odbywa się za pomocą elementu piezo wraz ze znajdującym się na nim zwierciadłem (MOPA), co umożliwia szybkie skanowanie wiązki w kierunku podłużnym (w głąb badanego obiektu) poprzez szybką zmianę różnicy dróg optycznych między ramionami pomiarowym i odniesienia w zakresie do 140  $\mu\text{m}$ . Zazwyczaj, z uwagi na zachowanie dużej rozdzielczości poprzecznej systemu, układ MOPA skanuje wiązkę w mniejszym zakresie (nie większym niż zakres Rayleigha skupionej przez soczewkę L 1 na badanym obiekcie wiązki promieniowania). Szybkie skanowanie przez element MOPA powoduje to, że widmo sygnału użytecznego z fotodetektorów skupione jest wokół częstotliwości zdudnieniowej  $f_D$  (patrz zależność (3)). W opisywanym systemie wynosi ona około 1 kHz. Sygnały o częstotliwości zdudnieniowej łatwo można odfiltrować od pozostałych sygnałów poprzez wykorzystanie w odbiorniku promieniowania optycznego filtru wąskopasmowego ustawionego na częstotliwość zdudnieniową. Jednocześnie z szybkim skanowaniem przez element MOPA badany obiekt skanowany jest w kierunku poprzecznym poprzez ruch stolików przesuwanych. Jeżeli wymagany zakres skanowania badanego obiektu w kierunku podłużnym jest większy niż zakres skanowania przez układ MOPA, wówczas po pełnym cyklu skanowania poprzecznego zmieniają się za pomocą stolików mechanicznych długości dróg optycznych ramion odniesienia i pomiarowego. Zmiany te dokonywane są tak, by nowa wartość głębokości, dla której występuje zerowa różnica dróg optycznych między tymi ramionami, pokrywała się z głębokością, dla której występuje przewężenie wiązki. Następnie jest wykonywane ponowne skanowanie badanego obiektu za pomocą układu MOPA przy jednoczesnym skanowaniu poprzecznym.

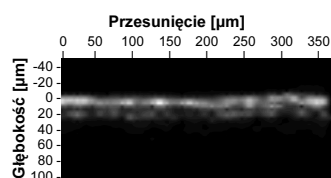
Źródłem promieniowania optycznego był femtosekundowy erbowy laser światłowodowy podłączony do światłowodu fotonicznego, co w rezultacie umożliwiało otrzymanie promieniowania

szerokopasmowego metodą generacji „superkontinuum” (wykorzystano tu laser i światłowód będące elementami źródła szerokopasmowego typu TB 1550 firmy MenloSystem, Niemcy). Promieniowanie optyczne wychodzące z tego źródła przechodziło następnie poprzez filtry interferencyjne, co pozwoliło kształtować charakterystykę widmową promieniowania wykorzystywanego w pomiarach tak, aby uzyskać jak najlepszą podłużną zdolność rozdzielczą – niestety kosztem zmniejszenia dynamiki pomiarów. Źródło to pozwalało na przeprowadzenie pomiarów w przedziale długości fali 1200-1650 nm. Zastosowanie promieniowania optycznego z zakresu podczerwieni przy badaniach powłok ochronnych wydaje się zasadne ze względu na pigmenty, które są dodawane do farb lub lakierów w celach estetycznych lub informacyjnych (napisy, etykiety itp.). Z drugiej strony szerokie widmo źródła umożliwia uzyskanie dużej rozdzielczości podłużnej pomiarów. Rozdzielczość ta przy wyznaczeniu długości optycznej wynosiła 4  $\mu\text{m}$ . Tego samego rzędu była poprzeczna zdolność rozdzielcza. Uzyskana dynamika pomiarów przekraczała 92 dB.

W układzie zadbane również o kompensację dyspersji powodowanej przez soczewkę L 1 (poprzez zastosowanie identycznej soczewki L 2 w ramieniu odniesienia) i badany obiekt (poprzez element PP kompensujący dyspersję badanej próbki). Uzupełnieniem systemu był komputer PC sterujący pracą silników krokowych sterujących stoliki przesuwne i dokonujący akwizycji i analizy danych pomiarowych.

#### 4. Wyniki eksperymentu

Opracowany system pomiarowy wykorzystano w badaniach powłok ochronnych (jednorodnych i niejednorodnych) bazujących na warstwach farby lub lakieru. Tego typu powłoki są powszechnie stosowane w charakterze powłok antykorozyjnych, a także w celu ochrony przedmiotów wykonanych z drewna. Rys. 3 przedstawia przykładowy obraz uzyskany w wyniku skanowania powłoki ochronnej blachy stalowej wykorzystywanej w opakowaniach produktów żywnościowych. W skład tej powłoki wchodziło kilka warstw farby o różnych kolorach w różnych miejscach (na opakowaniu były drobne napisy i elementy graficzne w kolorach białym i ciemnobrązowym; w niektórych miejscach powłoka ochronna była przezroczysta). Jak widać, niejednorodności powłoki pokazane na rys. 3 są dobrze widoczne.

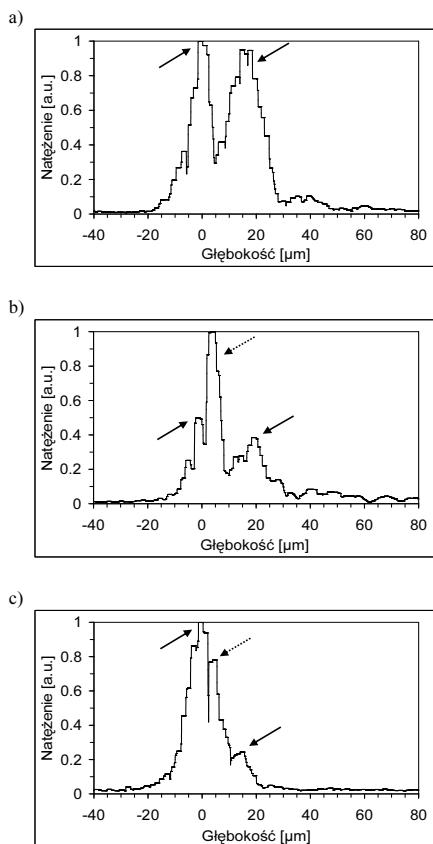


Rys. 3. Obraz OCT warstw antykorozyjnych (kilka warstw farby o różnych kolorach) chroniącej blachę stalową

Fig. 3. OCT image of protective anticorrosion protection paint layers (few paint layers having different colors) deposited on a steel tin

Następny etap badań związany był z bardziej dokładnym przetestowaniem systemu pomiarowego na możliwość detekcji sygnału z różnych miejsc badanej powłoki, charakteryzujących się różnymi kolorami. Na rys. 4 przedstawiono wyniki pomiaru natężenia promieniowania z miejsc, w których powłoka była przezroczysta (rys. 4a), miała kolor biały (rys. 4b) lub kolor ciemnobrązowy (rys. 4c).

Wyniki testów przedstawione na rys. 4 pokazują, że stosując opracowany system pomiarowy możliwa jest diagnostyka nie tylko powłok przezroczystych, ale także powłok zawierających pigmenty, które silnie rozpraszają lub pochłaniają promieniowanie optyczne. Możliwy jest tu pomiar grubości poszczególnych warstw (na rys. 3 i rys. 4 zaznaczona głębokość jest głębokością optyczną; głębokość geometryczna jest mniejsza o czynnik  $n_g$  – grupowy współczynnik załamania powłoki, który dla pokazanych powłok wynosił około 1,5).



Rys. 4. Natężenie wstecznie rozproszonego promieniowania pochodzącego od pojedynczego skanowania w głąb warstwy antykorozyjnej chroniącej blachę stalową. (a) – jednorodna przezroczysta warstwa farby, (b) i (c) – niejednorodna warstwa farby (pomiędzy warstwami przezroczystej farby znajduje się warstwa białej farby (b) lub ciemnobrązowej farby (c)). Strzałkami z linią ciągłą zaznaczono odbicie od powierzchni zewnętrznej (z lewej strony) i od granicy farba-metal (z prawej strony). Strzałki z liniami przerywanymi pokazują od kolorowej farby. Na rysunkach (b) i (c) można zauważyć odbicie promieniowania optycznego, pomimo jego silnego rozpraszania w farbie białej (b) lub tłumienia w farbie ciemnobrązowej (c)

Fig. 4. Depth scans of anticorrosion protection paint layers deposited on a steel substrate. (a) – homogeneous transparent paint layer, (b) and (c) – inhomogeneous transparent paint layer (between transparent layers there is a white paint layer (b) or a dark brown paint layer (c)). Solid-line arrows indicate reflection from the front (at the left side) and the back (at the right side) surface of the protection layer. Dashed-line arrows indicate reflection from color layers. In figure (b) and (c) we can see a reflection from metal surface in spite of high scattering of light by the white paint (b) or strong attenuation of light by the dark brown paint (c)

## 5. Wnioski

Badania pokazały, że interferometria niskokoherentna zastosowana w systemach OCT może być bardzo użyteczna ze względu na dużą ilość informacji, jaką ona dostarcza. Ogromną zaletą jest także to, że pomiary są bezkontaktowe i nieniszczące. Dzięki możliwości obserwacji chronionej powierzchni poprzez powłokę ochronną nawet w sytuacji stosowania farb lub lakierów zawierających pigmenty, można diagnozować wszelkie uszkodzenia powłoki, jej grubość, liczbę warstw itp. Dzięki temu, że możliwa jest obserwacja badanej powierzchni poprzez badaną powłokę, możliwa jest także obserwacja uszkodzeń chronionej powierzchni (na przykład w wyniku korozji). Technika ta może służyć także do nieniszczącej diagnostyki dzieł sztuki. W wielu tych zastosowaniach czas pomiaru nie jest parametrem krytycznym. Jednak wykorzystanie OCT przy produkcji masowej wymagałoby znacznego zwiększenia prędkości pozyskiwania i obróbki danych pomiarowych. Jest to możliwe przy zmianie konfiguracji systemu z pracy w dziedzinie czasu na pracę w dziedzinie częstotliwości, przy jednoczesnym opracowaniu wydajniejszych algorytmów obróbki

danych pomiarowych i zwiększeniu mocy obliczeniowych komputera sterującego systemem.

Praca została wykonana przy finansowym wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach Grantów Nr 3 T11B 009 27 i Nr N515 020 32/1069 oraz grantów BW i DS Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej.

## 6. Literatura

- [1] Flournoy P. A., McClure R. W., Wyntjes G.: White-light interferometric thickness gauge. *Applied Optics*, Vol. 11, No. 9, pp. 1907-1915, 1972.
- [2] Huang D., Swanson E. A., Lin C. P., Schuman J. S., Stinson W. G., Chang W., Hee M. R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C. A., Fujimoto J.G.: Optical coherence tomography. *Science*, Vol. 254, pp. 1178-1181, 1991.
- [3] Bouma B. E., Tearney G. J. (Eds): *Handbook of Optical Coherence Tomography*. Marcel Dekker, New York, 2002.
- [4] Bashkansky M., Duncan M. D., Kahn M., Lewis III D., Reintjes J.: Subsurface defect detection in ceramics by high-speed high-resolution optical coherent tomography *Optics Express*, Vol. 22, pp. 61-63, 1997.
- [5] Bashkansky M., Reintjes J.: Subsurface detection and characterization of Hertzian cracks in advanced ceramic materials using optical coherence tomography *Proceedings of SPIE*, Vol. 4703, pp. 46-52, 2002.
- [6] Wiesauer K., Pircher M., Götzinger E., Bauer S., Engelke R., Ahrens G., Grütznert G., Hitznerberger C. K., Stifter D.: En-face scanning optical coherence tomography with ultra-high resolution for material investigation. *Optics Express*, Vol. 13, 1015-1024, 2005.
- [7] Stifter D.: Beyond biomedicine: a review of alternative applications and developments for optical applications and developments for optical coherence tomography. *Applied Physics B*, Vol. 88, pp. 337-357, 2007.
- [8] Dunks J. P., Phelan F. R., Sanders D. P., Everett M. J., Green W. H., Hunston D. L., Parnas R. S.: The application of optical coherence tomography to problems in polymer matrix composites. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 35, pp. 135-147, 2001.
- [9] Wiesauer K., Pircher M., Götzinger E., Hitznerberger C. K., Engelke R., Grütznert G., Ahrens G., Oster R., Stifter D.: Measurement of structure and strain by transversal ultra-high resolution polarisation-sensitive optical ultra-high resolution polarisation-sensitive optical. *Insight*, Vol. 49, pp. 275-278, 2007.
- [10] Fabritius T. and Myllylä R.: Dynamic optical coherence tomography for paper wetting measurements *Proceedings of SPIE*, Vol. 6293, pp. 629307-1-6, 2006.
- [11] Jasapara J. C.: Non-invasive characterization of microstructured optical fibers using Fourier domain optical coherence tomography. *Optics Express*, Vol. 13, pp. 1228-1233, 2005.
- [12] Liang H., Cucu R., Dobre G. M., Jackson D. A., Pedro J., Panneill C., Saunders D., Podoleanu A. Gh.: Application of OCT to Examination of Easel Paintings. *Proceedings of SPIE*, Vol. 5502, pp. 378-381, 2004.
- [13] Liang H., Cid M. G., Cucu R. G., Dobre G. M., Podoleanu A. Gh., Pedro J., Saunders D.: En-face optical coherence tomography – a novel application of non-invasive imaging to art conservation. *Optics Express*, Vol. 13, No. 16, pp. 6133-6144, 2005.
- [14] Ali J. H., Wang W. B., Ho P. P., Alfano R. R.: Detection of corrosion beneath a paint layer by use of spectral polarization optical imaging *Optics Letters*, Vol. 25, pp. 1303-1305, 2000.
- [15] Stifter D., Sanchis Dufau A. D., Breuer E., Wiesauer K., Burgholzer P., Höglinger O., Götzinger E., Pircher M., Hitznerberger C. K.: Polarisation-sensitive optical coherence tomography for material characterisation and testing, *Insight* Vol. 47, pp. 209-212, 2005.
- [16] Fercher A. F., Drexler W., Hitznerberger C. K., Lasser T.: *Optical Coherence Tomography – principles and applications*. Reports on Progress in Physics, Vol. 66, No. 2, pp. 239-303, 2003.
- [17] Rollins A. M., Izaat J. A.: SNR analysis of conventional and optimal fiber-optic low-coherence interferometer topologies. *Proceedings of SPIE*, Vol. 3915, pp. 1605-7455, 2000.
- [18] Podoleanu A. Gh.: Unbalanced versus balanced operation in an optical coherence tomography system. *Applied Optics*, Vol. 39, No. 1, pp. 173-182, 2000.