

**Przemysław RYBACZEWSKI**POLITECHNIKA POZNAŃSKA – WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY,  
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań**Badanie możliwości wykrywania obiektów ukrytych w ośrodku mętnym optycznie z wykorzystaniem diod LED i światłowodu**

Mgr inż. Przemysław RYBACZEWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, gdzie w roku 2010 uzyskał tytuł magistra inżyniera o profilu dyplomowania: Pomiary w Technice i Medycynie. Obecnie jest doktorantem w Zakładzie Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej. Zainteresowania naukowe: metrologia ukierunkowana na pomiary biomedyczne, zwłaszcza z zastosowaniem optoelektroniki.



e-mail: przemyslaw.rybaczewski@gmail.com

**Streszczenie**

Podstawowym celem obrazowania medycznego jest wykrywanie zmian patologicznych występujących w badanym organizmie. Obiekt biologiczny zasymulowano blokiem tworzywa poliamid PA6. Prace eksperymentalne miały na celu zbadanie możliwości wykrywania ciał obcych w ośrodku mętnym optycznie. Wyniki badań poprzędono omówieniem specyfiki transmitancji obiektów mętnych optycznie oraz warunków badań. Ze względu na nieporównywalnie większą złożoność żywych organizmów przeprowadzone badania należy traktować jako prace wstępne. Wydaje się uzasadnione prowadzenie dalszych prac z użyciem bardziej zaawansowanych fantomów optycznych obiektów biologicznych.

**Słowa kluczowe:** transiluminacja, mętność optyczna, podczerwień.

**The study on the possibility of detecting hidden objects in optically turbid medium with the use of LEDs and optical fiber****Abstract**

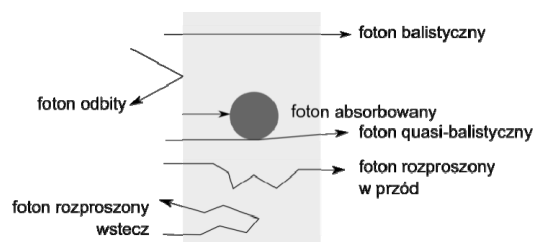
The main purpose of medical imaging is to detect pathological changes taking place in the examined body [1]. The research methodology and the presented approach towards the issue of detecting the hidden objects in an optically turbid object is presented in the publications of other authors. The measurements were taken in the following system: optical radiation source (LED  $\lambda=760\text{nm}$ ) - tested object - spectrometer (connected to a computer) with optical fiber (Fig. 2). A biological object was simulated with the use of a plastic block - polyamide PA6 with embedded obstacles (Fig. 3). The built system allows object scanning in the  $OX$  axis with 1 mm resolution. The experimental work was aimed at examining the possibility of detecting foreign bodies in an optically turbid medium. The results were preceded by a review of the specifics of the transmittance of optically turbid objects and test environment. The paper also presents the influence of the type of optical fiber used and the distance between the optical fiber end face and the object on the recorded result. Due to the incomparably greater complexity of living organisms, the performed studies should be seen as a preliminary work. It seems reasonable to carry out further work with the use of more advanced optical phantoms of biological objects.

**Keywords:** transillumination, turbid media, infrared.

**1. Wstęp**

Promieniowanie optyczne z zakresu bliskiej podczerwieni zastosowano po raz pierwszy przed blisko 85 laty w celu „ujrzenia” nowotworów w grubych warstwach tkanek [1]. Podstawowa idea transiluminacji promieniowaniem optycznym przetrwała do dnia dzisiejszego. W najprostszym ujęciu tor pomiarowy składa się z następujących bloków: źródło promieniowania optycznego – badany obiekt – detektor. Obiekt biologiczny jest ośrodkiem silnie rozpraszającym i absorbującym promieniowanie optyczne, stąd jest klasyfikowany jako optycznie mętny. Promieniowanie optyczne podczas przejścia przez ośrodek mętny może ulec wielokrotnemu rozproszeniu w przód i wstecz oraz absorpcji. Propaga-

wane przez obiekt fotony zmieniają kierunek ruchu losowo. Ze względu na trajektorię ruchu fotonów opuszczających obiekt na wyjściu można wyróżnić fotony: balistyczne, quasi-balistyczne i rozproszone (rys. 1) [2]. Możliwa jest sytuacja, w której foton rozproszony opuści obiekt w taki sam sposób jak balistyczny jednakże prawdopodobieństwo takiego zdarzenia jest znacznie mniejsze od prawdopodobieństwa propagacji fotonu balistycznego. Fotony balistyczne są najbardziej pożądane, ponieważ pozwalają najdokładniej odwzorować strukturę wewnętrzną badanego obiektu. Uzasadnione jest zatem dążenie do jak najlepszego odseparowania fotonów balistycznych od fotonów rozproszonych stanowiących zakłócenie. W doniesieniach literaturowych można spotkać metodę krótkich impulsów promieniowania optycznego (time-resolved) i szybkich bramek przed fotodetektoorem (time-gated) [3-5]. Metody te są jednak bardzo kosztowne i znajdują zastosowanie tylko w nielicznych laboratoriach. Spotyka się również wzmianki o koncepcji absorpcyjnej i rozproszeniowej tomografii optycznej bez separacji fotonów rozproszonych i balistycznych [6].



Rys. 1. Trajektorie fotonów w ośrodku mętnym optycznie [5]

Fig. 1. Trajectories of photons in the optically turbid medium [5]

W pracy omówiono wyniki badań nad wykrywaniem ciał obcych wprowadzonych do obiektu badanego wykonanego z poliamidu PA6. Badania przeprowadzono w układzie źródło promieniowania optycznego (dioda LED) – obiekt badany – detektor (spektrometr ze światłowodem). W celu uzyskania jak najlepszych wyników badań eksperymentalnie dobrano typ światłowodu oraz warunki badań. Przedstawiono wpływ zastosowanego typu światłowodu oraz odległości czoła światłowodu – obiekt na zarejestrowany wynik. Prezentację efektów prac eksperymentalnych poprzedzono omówieniem warunków badań.

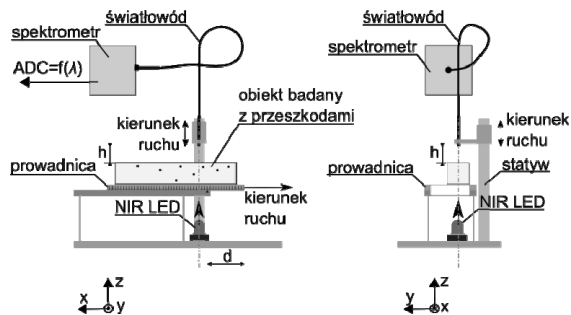
**2. Stanowisko badawcze**

Stanowisko badawcze wykonano dla następujących założeń projektowych:

- źródłem promieniowania optycznego (z zakresu bliskiej podczerwieni – NIR) jest dioda LED o średnicy 5 mm;
- detektorem promieniowania optycznego jest spektrometr z dołączonym światłowodem;
- dioda LED oraz światłowód są centrowane względem własnych osi optycznych (z niedokładnością nie gorszą niż 1 mm);
- obiektem badań jest optycznie mętna jednorodna struktura umożliwiająca wprowadzanie ciał obcych o innych właściwościach optycznych;
- obiekt badań ułożony na przewodnicy umożliwiającej przesuwanie go względem diody LED i światłowodu w osi  $OX$ ;
- rozdzielczość skanowania 1 mm;
- wyniki badań powinny umożliwić ocenę skuteczności wykrywania przeszkody w obiekcie optycznie mętnym.

Stanowisko badawcze (rys. 2) składa się z emitera promieniowania optycznego, badanego obiektu oraz spektrometru z dołą-

czonym światłowodem. Emiterem promieniowania z zakresu bliskiej podczerwieni jest dioda LED o długości fali 760 nm. Diodę LED oraz światłowód umieszczono w taki sposób, że ich osie optyczne niemal pokrywają się. Obiekt badany ułożono na prowadnicy umożliwiającej jego ruch w osi  $OX$  z rozdzielczością 1 mm. Przesunięcie w osi  $OX$  ma za zadanie umożliwienie skanowania obiektu w układzie światłowód – dioda LED. Obiekt badany unieruchamia się na nieprzepuszczalnej (dla promieniowania podczerwonego) płycie z otworem wyciętym wzdłuż osi  $OX$ . Obiektem badań jest tworzywo sztuczne poliamid PA6 o barwie białej, charakteryzujące się stosunkowo dużą mętnością optyczną (podobnie jak tkanka biologiczna).



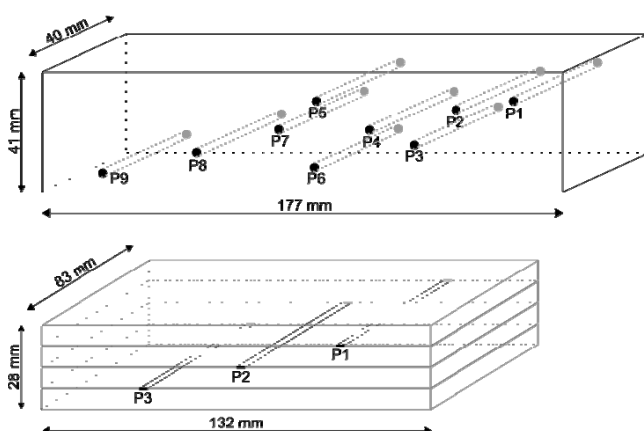
Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska badawczego – widok z przodu i z boku  
Fig. 2. Block diagram of the measuring setup - view from its front and back

W badaniach użyto dwóch modeli obiektu (rys. 3):

- jednowarstwowy blok tworzywa PA6 z nawierconymi w osi  $OY$  otworami umożliwiającymi wprowadzenie przeszkody o średnicy maksymalnej 3mm;
- model warstwowy składający się z czterech płytek tworzywa PA6 (każda o grubości 7mm) umożliwiający wprowadzenie stosunkowo cienkich obiektów o innych właściwościach optycznych;

Jako przeszkodę nieprzepuszczalną dla promieniowania optycznego zastosowano pręty i płaskowniki stalowe o długości równej szerokości obiektu.

Przyjęty model nie stanowi fantomu tkanki lub obiektu żywego, służy jedynie wstępnej ocenie możliwości wykrywania ciał obcych w ośrodku optycznie mętnym.



Rys. 3. Obiekty badań – jednowarstwowy (u góry) i czterowarstwowy (u dołu)  
Fig. 3. The objects of research - single (top) and four layered (bottom)

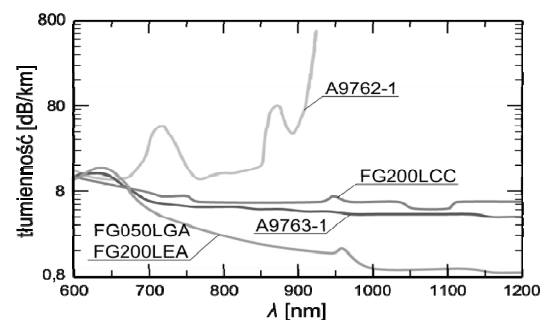
Odbiornikiem promieniowania jest spektrometr C10082CA prod. HAMAMATSU o zakresie widmowym 200-800 nm z dołączonym światłowodem o charakterystyce widmowej dostosowanej do użytego w badaniach emitera. Spektrometr pracuje w trybie ciągłym, dołączony do zewnętrznego komputera z zainstalowanym dedykowanym oprogramowaniem.

Dla każdego punktu pomiarowego (na osi  $OX$ ) otrzymuje się charakterystykę widmową z zakresu 200-800 nm. Z otrzymanych charakterystyk widmowych wybierana jest wartość dla długości fali 771,66 nm (wartość szczytowa widma diody LED).

### 3. Warunki badań

Przed przystąpieniem do realizacji właściwego celu badań przeprowadzono ocenę wpływu wybranych typów światłowód oraz odległości czoła światłowodu od powierzchni badanego obiektu na rejestrowane wyniki.

Ocenie poddano pięć typów światłowód różniących się charakterystyką tłumienności (rys. 4) i średnicą rdzenia (tab. 1).



Rys. 4. Tłumienność w funkcji długości fali transmitowanego promieniowania wybranych typów światłowód [8-10]

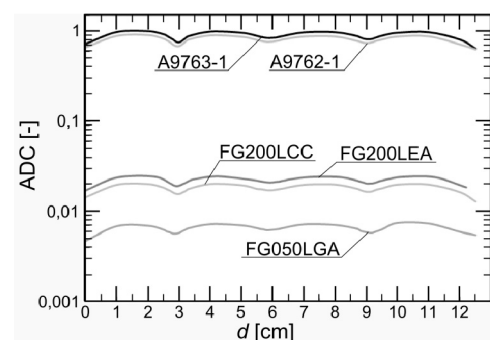
Fig. 4. Changes in attenuation =  $f(\lambda)$  as a function of the wavelength for selected types of fiber optics [8-10]

Zastosowane typy światłowód są wielomodowe o profilu skokowym i aperturze numerycznej wynoszącej 0,22 [8-10].

Tab. 1. Zestawienie wymiarów wybranych typów światłowód [8-10]  
Tab. 1. Dimensions of the selected types of fiber optics [8-10]

Typ światłowodu	FG050 LGA	FG200 LCC	FG200 LEA	A9763-01	A9762-01
Średnica rdzenia [μm]	50	200	200	600	600

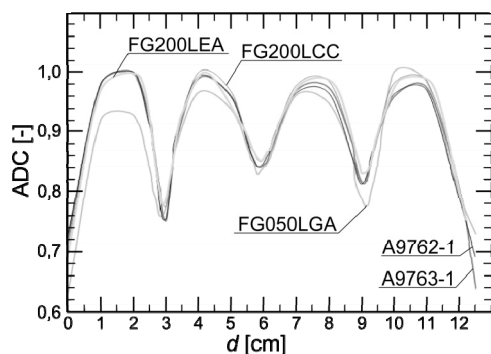
W badaniu użyto obiektu czterowarstwowego z osadzonymi trzema przeszkodami w postaci poczernionych metalowych płaskowników, każdy o szerokości 3mm. Obiekt prześwietlono w tych samych punktach dla każdego typu światłowodu, następnie sprowadzono charakterystyki do równych czasów integracji i znormalizowano do wartości 1. Charakterystyki znormalizowano do wartości 1 zarówno globalnie (dla wartości maksymalnej spośród wszystkich punktów pomiarowych), jak i lokalnie (dla wartości maksymalnych z każdej serii pomiarowej). Pierwsze podejście służy porównaniu wartości mocy sygnału rejestrowanego przez detektor (rys. 5). Drugie podejście natomiast pozwala ocenić jakościowo wyniki pomiarów uzyskane dla różnych typów światłowodu.



Rys. 5. Zależność  $ADC=f(d, h=2 \text{ mm})$  – normowana globalnie  
Fig. 5. Changes in  $ADC = f(d, h=2 \text{ mm})$  - globally standardized

Na rys. 5 zestawiono charakterystyki  $ADC = f(d)$  dla różnych typów światłowodów przy zachowaniu stałej odległości  $h$  czoła światłowodu od obiektu testowego. Na osi  $d$  naniesiono układ współrzędnych dla obiektu (współrzędną po długości). Cechą wspólną charakterystyk jest powtarzalność występowania lokalnych ekstremów. W szczególności dobrze zauważalne są minima lokalne pokrywające się z położeniem przeszkody w obiekcie. Zróżnicowanie charakterystyk co do wartości wynika z tłumienia toru optycznego światłowodów – detektor spektrometru. Czynniki wpływającymi na wartość sygnału optycznego rejestrowanego przez spektrometr są: tłumienność światłowodu, przekrój poprzeczny światłowodu, niedoskonałość powierzchni czoła światłowodu oraz niezachowanie centryczności i odległości czoła światłowodu względem detektora spektrometru. Ze względu na niewielką długość zastosowanych światłowodów (1...1,5 m) wpływ tłumienności światłowodu na pomiar jest pomijalnie mały. Obserwacje światłowodów pod mikroskopem umożliwiły ocenę niedoskonałości ścięcia światłowodów (czoło nie jest prostopadłe do powierzchni włókna). Z powodu ograniczeń technicznych nie przeprowadzono obserwacji powierzchni czoła światłowodów. Największe tłumienie sygnału wnosił światłowod FG050LGA, jednak nie można wykluczyć tutaj błędu wynikającego z niedokładności osiowania układu światłowodów – dioda LED. Przeprowadzony eksperyment potwierdza, iż wartość mocy doprowadzonej do detektora wzrasta wraz ze średnicą rdzenia światłowodu.

Na rys. 6 przedstawiono charakterystyki  $ADC = f(d)$  dla różnych typów światłowodów normowane lokalnie. Za kryterium oceny jakościowej przyjęto nachylenie przebiegu (pochodną) w kierunku lokalnego minima, a więc możliwość najlepszego określenia położenia krawędzi przeszkody w materiale testowym.



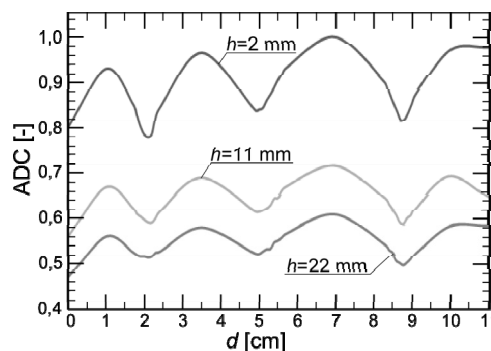
Rys. 6. Zależność  $ADC=f(d, h=2 \text{ mm})$  – normowana lokalnie  
Fig. 6. Changes in  $ADC = f(d, h=2 \text{ mm})$  - locally standardized

Na podstawie otrzymanych charakterystyk (rys. 6) wydaje się, że typ światłowodu (spośród badanych) nie wpływa na rozdzielczość metody. Typ światłowodu przedkłada się natomiast znacząco na tłumienie sygnału doprowadzanego do detektora.

Innym istotnym aspektem doboru warunków badań jest odległość  $h$  czoła światłowodu od powierzchni badanego obiektu. Przyjmując wartość katalogową apertury numerycznej światłowodu wynoszącą 0,22 [8-10] otrzymano stożek akceptacji o pełnym kącie rozwarcia wynoszącym około  $25^\circ$ . Przy odległości  $h = 2 \text{ mm}$  pole powierzchni podstawy stożka akceptacji, z której może zostać zarejestrowany sygnał wynosi  $0,64 \text{ mm}^2$  (średnica 0,9 mm), podczas gdy dla  $h = 22 \text{ mm}$  pole wzrasta do wartości  $77,34 \text{ mm}^2$  (średnica 9,92 mm).

Na rys. 7 przedstawiono zależność wielkości sygnału rejestrowanego przez detektor spektrometru od wysokości  $h$  czoła światłowodu FG200LEA nad obiektem. Wpływ odległości  $h$  czoła światłowodu od obiektu przejawia się zarówno ilościowo jak i jakościowo. Wraz ze wzrostem odległości  $h$  maleje wartość sygnału oraz nachylenie charakterystyk w kierunku lokalnych minimum. Oznacza to, że ulega pogorszeniu zdolność rozpoznawania ciał obcych ukrytych w obiekcie, a zatem maleje rozdzielczość metody. Pogorszenie jakościowe spowodowane jest aperturą

numeryczną światłowodu – wraz z wzrostem odległości  $h$  wzrasta również pole powierzchni skanowanej. W konsekwencji rejestrowany sygnał jest w pewnym stopniu uśredniony.



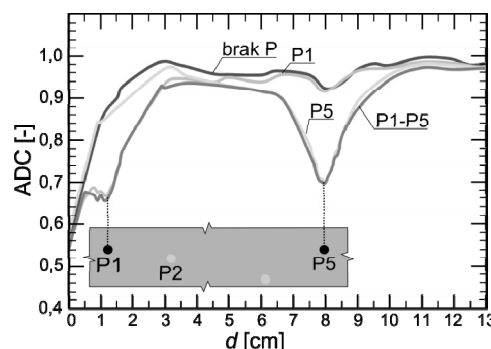
Rys. 7. Zależność  $ADC=f(d)$  dla wybranych odległości  $h$  światłowodu od obiektu  
Fig. 7. Changes in  $ADC = f(d)$  for chosen optical fiber distance  $h$  from the object

Przeprowadzona próba potwierdza obecność w sygnale rejestrowanym fotonów rozproszonych.

#### 4. Wyniki badań i próba ich interpretacji

Zasadniczą część badań przeprowadzono w układzie z światłowodem FG200LEA, którego czoło umieszczono na wysokości 2 mm od powierzchni jednowarstwowego bloku tworzywa PA6. W obiekcie umieszczano czernione przeszkody stalowe o średnicy 3 mm w różnych kombinacjach – każdorazowo sporządzając charakterystykę  $ADC=f(d)$ . W celu lepszego zobrazowania zachodzących zjawisk ograniczono próby do obecności dwóch przeszkód jednocześnie. Na rysunkach (rys. 8-11) zaprezentowano otrzymane charakterystyki dla osadzeń przeszkód w obiekcie. Pomiar wykonano dla każdej przeszkody osobno oraz dla obu jednocześnie (charakterystyka wypadkowa). Otrzymane charakterystyki odniesiono do przebiegu referencyjnego („brak P”) otrzymanego dla obiektu bez obecności przeszkód. Dodatkowo na wykresach naniesiono widok fragmentu bloku tworzywa z zaznaczonymi przeszkodami.

Na rys. 8 przedstawiono charakterystyki  $ADC=f(d)$  otrzymane przy obsadzeniu bloku przeszkodami P1 i P5. Przeszkody są rozmieszczone względnie w dalekiej odległości od siebie (około 7 cm). Charakterystyka wypadkowa (P1-P5) niemal pokrywa się z przebiegami otrzymanymi dla każdej przeszkody osobno.

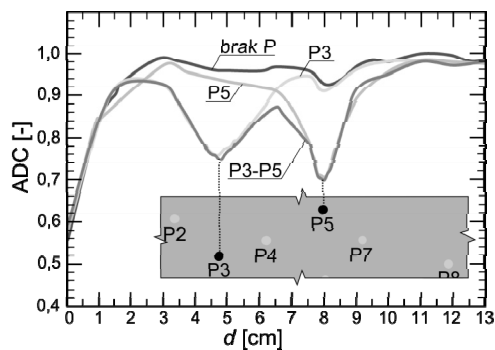


Rys. 8. Zależność  $ADC=f(d, h=2 \text{ mm})$  dla kombinacji przeszkód P1 i P5 oraz widok w przekroju fragmentu modelu testowego  
Fig. 8. Changes in  $ADC=f(d, h=2 \text{ mm})$  for the combination of barriers P1 and P5 and cross-sectional view of the part of the test model

Ponadto można zauważyć opadanie charakterystyki w pobliżu  $d = 0 \text{ cm}$ . Jest to spowodowane „wyciekaniem” części promieniowania rozproszonego przez ścianę boczną obiektu. Efekt zanika przy odsunięciu się od krawędzi obiektu o około 3 cm.

Na rys. 9 przedstawiono przypadek, w którym przeszkody są umieszczone na różnej głębokości w rozstawie około 3 cm. Przeszkoda P5 umieszczona jest bliżej detektora stąd wartość sygnału jest mniejsza niż dla P3. Ponadto stromość zboczy w kierunku minimum lokalnego dla przeszkody P5 jest większa niż dla P3.

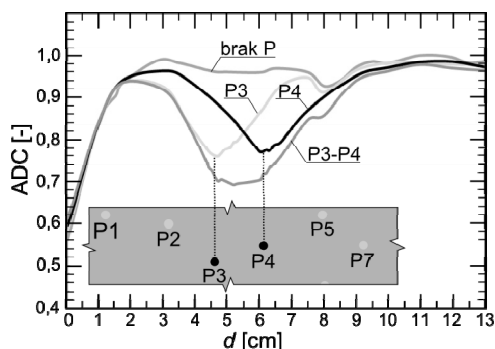
Przebieg referencyjny („brak P”) ma lokalne minimum dla  $d = 8\text{ cm}$ . Ekstremum to pokrywa się z położeniem P5 – w materiale badanym występuje pusta przestrzeń. W przedziale  $d \in (3,0;6,5)$  zauważalne jest obniżenie wartości charakterystyki referencyjnej. W tym przedziale występują otwory dla P2, P3 i P4. Możliwe jest zatem również wykrywanie przestrzeni wypełnionych powietrzem, ale ze znacznie mniejszą rozdzielczością i głębokością postrzegania (patrząc od strony detektora).



Rys. 9. Zależność  $ADC=f(d, h=2\text{mm})$  dla kombinacji przeszkód P3 i P5 oraz widok w przekroju fragmentu modelu testowego

Fig. 9. Changes in  $ADC=f(d, h=2\text{mm})$  for the combination of barriers P3 and P5 and cross-sectional view of the part of the test model

Na rys. 10 zestawiono charakterystyki dla przeszkód umieszczonych w lokalizacjach P3 i P4 o rozstawie około 1,5 cm. Z wypadkowej charakterystyki P3-P4 nie można wnioskować o występowaniu dwóch przeszkód. Możliwa interpretacja może zakładać np. występowanie jednej przeszkody o większych wymiarach (około 1 cm szerokości).

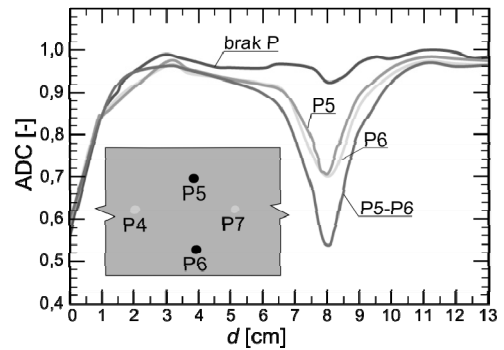


Rys. 10. Zależność  $ADC=f(d, h=2\text{mm})$  dla kombinacji przeszkód P3 i P4 oraz widok w przekroju fragmentu modelu testowego

Fig. 10. Changes in  $ADC=f(d, h=2\text{mm})$  for the combination of barriers P3 and P4 and cross-sectional view of the part of the test model

Rysunek 11 przedstawia przypadek w którym przeszkody położone są: blisko detektora (P5) i blisko źródła promieniowania (P6). Otrzymane charakterystyki dla każdej przeszkody z osobna niemal się pokrywają. Na wypadkowej charakterystyce P5-P6 następuje pogłębienie minima lokalnego. Fakt ten jest wytłumaczalny trajektorią ruchu fotonów rozproszonych. Jeżeli w obiekcie była osadzona tylko przeszkoda P6 wówczas detektor rejestrował również fotony rozproszone w przestrzeni obiektu ponad nią.

Obsadzenie przeszkody P5 w prześwietlanym bloku spowodowało przysłonięcie fotonów rozproszonych oraz zmianę ich trajektorii, a co za tym idzie poszerzenie obszaru ekstremum.



Rys. 11. Zależność  $ADC=f(d, h=2\text{mm})$  dla kombinacji przeszkód P5 i P6 oraz widok w przekroju fragmentu modelu testowego

Fig. 11. Changes in  $ADC=f(d, h=2\text{mm})$  for the combination of barriers P5 and P6 and cross-sectional view of the part of the test model

## 5. Podsumowanie

W pracy opisano warunki i wyniki badań nad możliwością wykrywania obiektów ukrytych w optycznie mętnym ośrodku z użyciem diody LED i światłowodu. Prace eksperymentalne miały na celu poszukiwanie takiej konfiguracji światłowodów – obiekt, która zapewniałaby najlepsze odwzorowanie ukrytych obiektów. Badania przeprowadzono w uproszczonym modelu. Mają one charakter poznawczy w ujęciu jakościowym, przewiduje się dalsze prace mające na celu ocenę ilościową z zastosowaniem fantomów tkanek. Istotnym aspektem dalszych prac jest zadanie odwrotne, a więc zlokalizowanie i określenie wymiarów przeszkody w obiekcie na podstawie wyniku pomiaru. Analiza rezultatów badań prowadzi do stwierdzenia, że sukces rozpoznania struktury obiektu w dużym stopniu zależy od wzajemnego położenia elementów silnie pochłaniających. Jest to poważne utrudnienie w praktycznym wykorzystaniu proponowanej metody w badaniach biomedycznych prowadzące do znaczącego wzrostu skomplikowania algorytmów identyfikujących strukturę badanego obiektu.

## 6. Literatura

- [1] Cutler M.: Transillumination of the breast, Surg. Gynecol. Obstet. 48, pp. 721–727, 1929.
- [2] Szczepanowski R., Mrocza J.: Model dyfuzji fotonów w diagnostyce krwi, KM. Materiały kongresowe, Wrocław, T. 2, s. 543-546, 2004.
- [3] Liu F., Yoo K.M., Alfano R.R.: Ultrafast laser-pulse transmission and imaging through biological tissues, Applied Optics, vol.32, pp.554-558, 1993.
- [4] Hebden J.C., Kruger R.A., Wong K.S.: Time-resolved imaging through a highly scattering medium, Applied Optics vol. 30, pp.788-794, 1991.
- [5] Duncan M.D., Mahon R., Tankersley L.L., Reintjes J.: Time-gated imaging through scattering media using simulated Raman Amplification, Optics Letters 16, pp.1868-1870, 1991.
- [6] Domański A.W., Kubel M., Pawlak I., Petelczyc K., Rytel M.: Absorpcyjna i rozproszeniowa tomografia optyczna, XIII KBIB 2003, Biopomiary – Metody Optyczne, Tom II, str. 883-888, 2003.
- [7] Swartling J., Andersson-Engels S.: Optical mammography – a new method for breast cancer detection using ultra-short laser pulses, DPOS-NYT 4-2001, pp.19-21, 2001.
- [8] Thorlabs, Karta katalogowa światłowodu FG050LGA i FG200LEA.
- [9] Thorlabs, Karta katalogowa światłowodu FG200LCC.
- [10] Hamamatsu, Karta katalogowa światłowodu A9763-01 i A9762-01.

otrzymano / received: 07.02.2014

przyjęto do druku / accepted: 03.03.2014

artykuł recenzowany / revised paper