

Politechnika Wrocławskiego
Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Kierunek: **Informatyczne Systemy Automatyki**

Specjalność: **Inteligentne Systemy Przemysłu 4.0**

**PRACA DYPLOMOWA
MAGISTERSKA**

**Opracowanie aplikacji zarządzającej
systemem optycznym do pomiaru grubości
tafli wody**

inż. Rafał Ignacy

Opiekun pracy
dr inż. Adrian Zakrzewski

Słowa kluczowe: pomiar grubości, czujnik chromatyczny, oprogramowanie, obróbka laserowa

WROCŁAW 2024

STRESZCZENIE

Praca dotyczy zagadnienia pomiaru grubości warstwy wody. Problemem jest występujący rozprysk ciekłego metalu podczas procesu grawerowania głowicą laserową. W celu uniknięcia rozprysku metal pokrywany jest cienką warstwą wody. Aby proces obróbki z nałożoną powłoką wody przynosił pożądane efekty należy wzmacnić wiązkę laserową, która ulega propagacji. Istotne jest ustalenie grubości warstwy, bo propagacja promieni jest z nią skorelowana. Określenie grubości odbywa się przez wykorzystanie systemu optycznego bazującego na zjawisku aberracji chromatycznej podłużnej.

Na potrzeby pomiaru grubości dokonano wyznaczenia zakresu pomiarowego budowanego czujnika. W dalszych etapach skalibrowano układ optyczny na podstawie wyliczonych krzywych kalibracyjnych. Po przeprowadzeniu tych procedur zostało wytworzzone oprogramowanie w języku C#. Zadaniem aplikacji była komunikacja i sterowanie peryferiami systemu optycznego - spektrometrem i platformą laboratoryjną. Odczytane sygnały spektralne posłużyły do wyodrębnienia charakterystycznych długości fal. Na ich podstawie została wyliczona grubość warstwy.

Przeprowadzone zostały badania porównawcze metod, których celem jest określenie długości fal do pomiaru grubości. Porównano cztery metody - filtr średniej ruchomej oraz algorytmy dopasowania krzywych na podstawie trzech modeli matematycznych. Uzyskane rezultaty posłużyły do wybrania najlepszej metody odczytu poszukiwanych długości fal do wyznaczenia grubości, aby finalnie zaimplementować ją w opracowanej aplikacji.

ABSTRACT

The paper relates to the issue of measuring the thickness of the water layer. The problem is the occurrence of splashing of liquid metal during the laser head engraving process. In order to avoid splashing, the metal is coated with a thin layer of water. To make the processing with the applied water coating bring the desired results, the laser beam that is propagated must be enhanced. It is important to determine the thickness of the layer, because beam propagation is correlated with it. Determination of thickness is done by using an optical system based on the phenomenon of longitudinal chromatic aberration.

For the purpose of thickness calculation, the measurement range of the constructed sensor was determined. In further steps, the optical system was calibrated based on the calculated calibration curves. After these procedures were performed, software in C# language was developed. The task of the application was to communicate and control the periphery of the optical system - the spectrometer and the laboratory platform. The retrieved spectral signals were used to extract characteristic wavelengths. Based on them, the thickness of the layer was calculated.

A comparative study of methods has been performed to determine the wavelengths for thickness measurement. Four methods were compared - moving average filter and curve fitting algorithms based on three mathematical models. The results were used to select the best method for reading the required wavelengths for thickness measurement. That method was finally implemented in the application that was being developed.

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie	3
Cel pracy	5
Zakres pracy	6
1. Propagacja promieniowania elektromagnetycznego	8
1.1. Transmisja i załamanie fali	8
1.2. Odbicie światła	9
1.3. Rozpraszanie światła	10
1.4. Absorpcja promieniowania	11
1.5. Podsumowanie	12
2. Pomiar grubości	13
2.1. Czujnik laserowy triangulacyjny	14
2.2. Układ czujnika wioprowadowego z czujnikiem laserowym triangulacyjnym	17
2.3. Czujnik ultradźwiękowy	18
2.4. Interferometria	20
2.5. Elipsometria	22
2.6. Konfokalny czujnik chromatyczny	24
2.6.1. Aberracja chromatyczna	24
2.6.2. Budowa i zasada działania konfokalnego czujnika chromatycznego	25
2.6.3. Pomiar grubości materiału transparentnego na podstawie wyznaczenia parametrów układu optycznego	26
2.6.4. Pomiar grubości materiału transparentnego z użyciem reflektora	29
2.7. Podsumowanie	31
3. Implementacja aplikacji	32
3.1. Wybór języka programowania, konfiguracja środowiska uruchomieniowego i komunikacja z peryferiami	32
3.2. Struktura projektu	32
3.3. Sekcja obsługi spektrometru	34
3.4. Sekcja obsługi platformy laboratoryjnej	36
3.5. Sekcja pomiaru grubości warstwy materiału	37
3.6. Sekcja wyznaczania krzywej kalibracyjnej	39
4. Badania	41
4.1. Budowa systemu optycznego	41
4.2. Ustalenie zakresu pomiarowego czujnika	44

4.3.	Wyznaczenie krzywej kalibracyjnej	49
4.4.	Stworzenie naczynia do pomiaru warstwy cieczy o wyznaczonej grubości	53
4.5.	Pomiar grubości warstwy wody	54
4.6.	Odczyt szukanych długości fal z danych spektralnych	56
4.6.1.	Filtr średniej ruchomej	57
4.6.2.	Algorytmy dopasowania krzywych	58
4.7.	Walidacja	65
4.8.	Podsumowanie i wnioski dotyczące części badawczej	69
5.	Podsumowanie	71
Bibliografia		73
Spis rysunków		78
Spis tabel		82

WPROWADZENIE

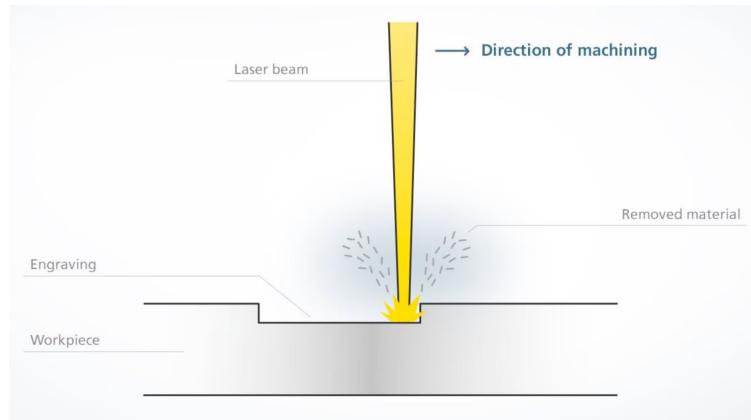
Współczesne systemy automatyki są odpowiedzialne za nadzór i kontrolę różnych procesów przemysłowych. Celem systemu jest zapewnienie optymalnych warunków procesu przemysłowego poprzez wywołanie odpowiednich akcji, na podstawie pozyskanych informacji o jego bieżącym stanie. Kontrola parametrów procesowych odbywa się przy użyciu układów pomiarowych, które przekazują dane do systemu automatyki. Pozyskane dane wejściowe są przetwarzane przez jednostki obliczeniowe. Wyniki obliczeń są przekazywane do urządzeń wyjściowych, które powodują zmianę parametrów procesu, aby utrzymać jego optymalne warunki.

Systemy laserowe charakteryzują się wysoką dokładnością i powtarzalnością przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wydajności pracy [1]. W procesach obróbki laserowej przekazywane jest mniej ciepła do materiału niż w przypadku tradycyjnych metod spawalniczych. W wyniku tego, materiał podlega mniejszym odkształceniom termicznym, a zakres strefy wpływu ciepła jest znikomy. Strefa wpływu ciepła jest obszarem wokół strefy obrabianej, którego właściwości i struktura mikroskopowa jest inna niż materiału obrabianego. Występowanie strefy wpływu ciepła jest niepożądanym skutkiem ubocznym [2, 3].

Ze względu na szereg zalet, systemy do obróbki laserowej znajdują zastosowanie w przeróżnych gałęziach przemysłu. Obróbka laserowa jest wykorzystywana do procesów m. in. spawania, napawania, hartowania, cięcia lub grawerowania. Najczęściej obróbka laserowa wykorzystywana jest do obrabiania metali. Do wad zastosowania systemów laserowych można uwzględnić wysoki koszt urządzeń oraz konieczność obsługi przez wyspecjalizowane osoby [2].

Proces grawerowania laserowego polega na celowym doprowadzeniu do wystąpienia ubytku materiału w obrabianym przedmiocie. W obróbce laserowej koherentna wiązka światła jest skupiana na obrabianym materiale. Absorbowana przez materiał wysoka ilość energii sprawia, że ten osiąga temperaturę parowania. Wtedy metal częściowo przechodzi bezpośrednio ze stanu stałego od razu w stan gazowy, z pominięciem stanu ciekłego. Proces ten nazywany jest ablacją laserową. W wyniku usunięcia materiału w obiekcie zostaje zagębień. Pozostały, ciekły metal na krawędziach zagębień jest wypychany przez ciśnienie parującego materiału, a następnie krzepnie [4].

Burzliwy przebieg wypychania metalu w stanie ciekłym przez ciśnienie parującego materiału powoduje, że podczas obróbki dochodzi do jego rozprysku wokół strefy obrabianej (rysunek 2). Bardzo często występujący rozprysk jest na tyle duży, że wymagane jest



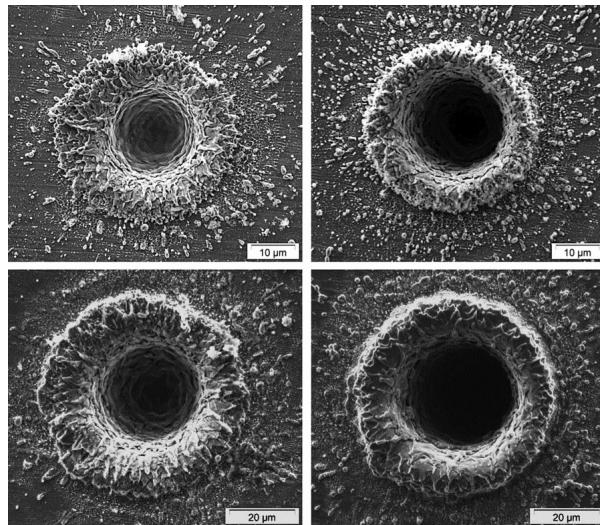
Rys. 1. Schemat przedstawiający przebieg procesu grawerowania laserowego [5]

zastosowanie obróbki mechanicznej (frezowanie, planowanie, polerowanie) jako obróbka wykończającą. Konieczność wykonywania dodatkowej obróbki wiąże się z wyższym kosztem całkowitego procesu. Stosując obróbkę mechaniczną istnieje także problem zachowania powtarzalności geometrycznej obrabianego obiektu. Obróbka mechaniczna charakteryzuje się tym, że operacje wykonywane są z pewną tolerancją geometryczną, przez co zawsze można zachować powtarzalność obiektu na takim poziomie jaki gwarantuje obróbka laserowa. Utrzymanie powtarzalności może być kluczowe dla różnych zastosowań obrabianych obiektów. Rozprysk jest również często wynikiem niepoprawnego doboru parametrów obróbki.

Przykładowo, na potrzeby sklejenia dwóch obiektów, przez proces obróbki laserowej dokonuje się zmian na klejonych powierzchniach w celu zapewnienia lepszej adhezji. W momencie, gdy obiekty muszą zostać obrabiane mechanicznie, za każdym razem adhezja kleju może się różnić, wtedy istnieje możliwość, że połączenie klejone nie będzie spełniać założonych wymagań wytrzymałościowych.

Sposobem na to, aby ograniczyć występowanie niepożądanego rozprysku metalu jest obróbka laserowa obiektu pokrytego cienką warstwą cieczy. Do tego zastosowania nie wymaga się żadnego specyficznego płynu, może zostać użyta woda. Podczas obróbki obiektu część energii promieniowania laserowego jest pochłaniana lub odbija się od powierzchni wody. W tym celu należy użyć do procesu laserowego wiązki o większej mocy, aby po zmianie natężenia promieniowania do powierzchni materiału docierała wiązka o wymaganych parametrach. Żeby dobrać odpowiednie parametry wiązki należy znać grubość warstwy wody, która przykrywa powierzchnię metalu.

Istnieją różne sposoby i czujniki umożliwiające zmierzenie grubości materiału transparentnego, którym jest wspomniana warstwa wody. Jednym z nich jest konfokalny czujnik chromatyczny, który wykorzystuje zjawisko aberracji chromatycznej. Na rynku są dostępne sensory chromatyczne, które dokonują pomiaru grubości materiałów transparentnych i mogłyby zostać wykorzystane do opisywanego procesu grawerowania.



Rys. 2. Zdjęcia mikroskopowe przedstawiające rozprysk obrabianego materiału w wyniku obróbki laserowej [6]

W kolejnych rozdziałach pracy zostaną przedstawione postępy prac nad tworzeniem oprogramowania do obsługi czujnika chromatycznego. Głównym zadaniem oprogramowania jest ustalenie grubości warstwy wody, po to, aby móc modyfikować parametry wiązki, a sam proces obróbki laserowej przebiegał optymalnie.

CEL PRACY

Głównym celem niniejszej pracy dyplomowej jest opracowanie aplikacji w języku C#, która posłuży do zarządzania systemem optycznym wykorzystywanym do pomiaru grubości warstwy wody. System optyczny obejmuje głowicę laserową ze zintegrowanym czujnikiem chromatycznym. Warstwa wody pokrywa powierzchnię materiału w celu poprawy jakości obróbki laserowej. Konieczne jest określenie jej grubości, ponieważ pozwoli to na korygowanie parametrów wiązki laserowej. Wiązka ulega propagacji na skutek transmisji przez wodę.

Oprogramowanie powinno realizować proces komunikacji z poszczególnymi periferiami systemu optycznego w celu akwizycji danych spektralnych. Kolejnym aspektem jest przetwarzanie i wizualizacja pozyskanych danych. W dalszych etapach zostanie przeprowadzona analiza efektywności różnych algorytmów przetwarzania pozyskiwanych danych spektralnych. Na samym końcu należy zaimplementować metodę pozwalającą na wyznaczenie grubości warstwy cieczy na bazie zgromadzonych danych spektralnych. Ostatecznie należy przeprowadzić walidację systemu optycznego z wykorzystaniem opracowanej aplikacji oraz metody referencyjnej dla różnych grubości warstw wody.

Poszczególne zadania do wykonania w ramach realizacji pracy dyplomowej:

- zapoznanie się z budową oraz zasadą działania systemu do pomiaru grubości materiałów transparentnych
- stworzenie aplikacji w C# obsługującej system optyczny czujnika chromatycznego
- analiza efektywności różnych algorytmów przetwarzania danych spektralnych
- opracowanie metody pozwalającej na wyznaczenie grubości warstwy wody
- przeprowadzenie validacji systemu optycznego
- porównanie uzyskanych rezultatów z innymi rozwiązaniami dostępnymi na rynku

ZAKRES PRACY

Rozdział 1 opisuje podstawy teoretyczne dotyczące mechanizmów propagacji promieniowania elektromagentycznego. Przedstawiona wiedza odnośnie tych mechanizmów jest wykorzystywana w dalszych rozdziałach pracy. Podrozdział 1.1 zawiera treść dotyczącą zjawisk transmisji i załamania fal elektromagnetycznych. Opisano zagadnienia dyspersji ośrodka i wyprowadzono wzory matematyczne z których wynika zależność między kątem załamania a długością fali. Kolejny podrozdział 1.2 dotyczy mechanizmu odbicia światła. Następnie, podrozdział 1.3 obejmuje zagadnienia związane z rozpraszaniem światła. Zaś w podrozdziale 1.4 znajdują się informacje związane z absorpcją promieniowania, zostają wyprowadzone wzory opisujące korelację między współczynnikiem absorpcji a grubością warstwy ośrodka i przedstawiony wykres zależności absorpcji od długości promieniowania elektromagnetycznego. Na końcu rozdziału 1 znajduje się krótkie podsumowanie przedstawiające wpływ opisanych zjawisk na proces obróbki laserowej.

Rozdział 2 wprowadza zagadnienie dotyczące pomiaru grubości, również w kontekście pomiaru grubości warstwy wody, który jest realizowany w ramach niniejszej pracy. Kolejne podrozdziały opisują różne typy czujników umożliwiających dokonanie pomiaru grubości materiałów transparentnych, w tym wody. Zawarto budowę czujników i zasadę ich działania, a także istotne cechy każdego typu sensora. Pierwszy podrozdział 2.1 zawiera opis dotyczący czujnika laserowego triangulacyjnego. Następnie w podrozdziale 2.2 przedstawiono informacje o pomiarze grubości czujnikiem wiroprowadowym w układzie z sensorem laserowym. Kolejny podrozdział 2.3 obejmuje treść na temat czujnika ultradźwiękowego. Zaś podrozdział 2.4 opisuje typ czujników interferometrycznych. Następny podrozdział 2.5 zawiera opis wykorzystania elipsometrów do pomiaru grubości. Ostatni podrozdział 2.6 obszernie opisuje zagadnienia związane z konfokalnym czujnikiem chromatycznym. W pierwszym podpodrozdziale 2.6.1 wyjaśniono kluczowe dla tego sensora zjawisko aberracji chromatycznej. Następny podpodrozdział 2.6.2 opisuje budowę i zasadę działania czujnika chromatycznego. Ostatnie dwa podpodrozdziały 2.6.3, 2.6.4 zawierają opisane metody pomiaru grubości tym czujnikiem, z użyciem reflektora oraz na podstawie wyznaczonych parametrów układu optycznego.

Następny z rozdziałów 3 dotyczy opisu tworzonego oprogramowania i jego funkcjonalności. Podrozdział 3.1 odnosi się do konfiguracji środowiska uruchomieniowego oraz wyboru języka programowania. Kolejny podrozdział 3.2 opisuje strukturę podziału kodu na poszczególne klasy oraz sekcje interfejsu graficznego. Dalsze podrozdziały 3.3, 3.4, 3.5 oraz 3.6 szczegółowo wyjaśniają sposób realizacji poszczególnych funkcjonalności związanych z obsługą spektrometru i platformy laboratoryjnej, a także samej procedury pomiaru grubości i wyznaczania krzywej kalibracyjnej.

Ostatni rozdział 4 skupia się na omówieniu przeprowadzonych badań. Na samym początku podrozdział 4.1 przedstawia budowę systemu optycznego, który posłużył do przeprowadzenia badań. W dalszej kolejności podrozdział 4.2 zawiera szczegółowe zapisy związane z ustaleniem zakresu pomiarowego budowanego czujnika. Następny z podrozdziałów 4.3 nawiązuje do procedury wyznaczenia krzywej kalibracyjnej służącej do zweryfikowania poprawności ustawień układu optycznego. Dalszy podrozdział 4.4 przedstawia proces tworzenia odpowiedniego naczynia, które umożliwi pomiar grubości cieczy o zadanej grubości warstwy. Podrozdział 4.5 dotyczy ustalenia niezbędnych parametrów składowych i końcowej formy równania, które posłużą do wyliczenia grubości mierzonej warstwy. Z kolei podrozdział 4.6 omawia procedury dotyczące długości fal charakterystycznych, które posłużą do wyznaczenia grubości. Opisano w nim zastosowane metody ustalania tych zmiennych. W kolejnym podrozdziale 4.7 zostały przeanalizowane wyniki dokonanych pomiarów. Na końcu rozdziału umieszczono podrozdział 4.8 w którym omówiono wnioski wynikające z przeprowadzonych badań.

Na końcu pracy umieszczony został rozdział 5, podsumowujący całą pracę.

1. PROPAGACJA PROMIENIOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Promieniowanie laserowe charakteryzuje się monochromatycznością, czyli składa się z fal elektromagnetycznych o jednakowej długości. Ponadto, wiązka laserowa jest koherentna, czyli następuje zgodność faz promieni. Fale świetlne w wyniku spójności są równoległe. W wyniku wymienionych cech, wiązka laserowa jest wysoce intensywna i pozwala uzyskać ogromną gęstość energii w określonej objętości [7].

Środowisko naturalne ma istotny wpływ na propagację promieniowania laserowego poprzez różne mechanizmy. Podstawowe procesy charakteryzujące interakcje światła z materią obejmują transmisję, odbicie, rozpraszanie i absorpcję. Jednym z głównych skutków jest zmniejszenie amplitudy i długości koherencji promieniowania laserowego. Środowisko wpływa też na odchylenie oraz zmianę prostoliniowości biegu emitowanego światła [8].

1.1. TRANSMISJA I ZAŁAMANIE FALI

Fale świetlne skierowane na materiał ulegają transmisji wgłęb, po przejściu do innego ośrodku zmienia się ich kąt transmisji. Dyspersja materiału opisuje zależność pomiędzy współczynnikiem załamania światła, przez ośrodek, a długością fali świetlnej (równania 1.1, 1.2). Każdy ośrodek charakteryzuje się różną prędkością transmisji fali, w wyniku czego dochodzi do zjawiska refrakcji, czyli załamania światła [9, 10]. Refrakcja jest opisana jako stosunek prędkości światła w próżni oraz prędkości światła w danym ośrodku (równanie 1.2).

Różny kąt padania światła przy przechodzeniu z jednego ośrodku do drugiego jest skutkiem zmiany prędkości promieni między tymi ośrodkami. Na skutek dyspersji fale świetlne o różnych długościach są załamywane pod różnym kątem. Kąt załamania jest tym większy im większa jest długość fali. Zależność między współczynnikiem a kątem załamania opisuje prawo Snelliusa (równanie 1.3) [12].

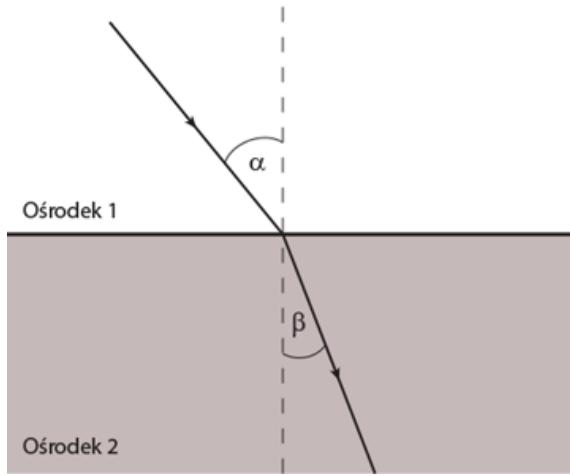
$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1.1)$$

gdzie:

λ – długość fali

v – prędkość fali

f – częstotliwość fali



Rys. 1.1. Załamanie fali przechodzącej z ośrodka 1 do ośrodka 2; α - kąt padania, β - kąt załamania [11]

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

gdzie:

n – współczynnik refrakcji w danym ośrodku

c – prędkość światła w próżni

v – prędkość światła w ośrodku

$$\sin \alpha \cdot n_1 = \sin \beta \cdot n_2 \quad (1.3)$$

gdzie:

$\sin \alpha$ – kąt padania światła

$\sin \beta$ – kąt załamania światła

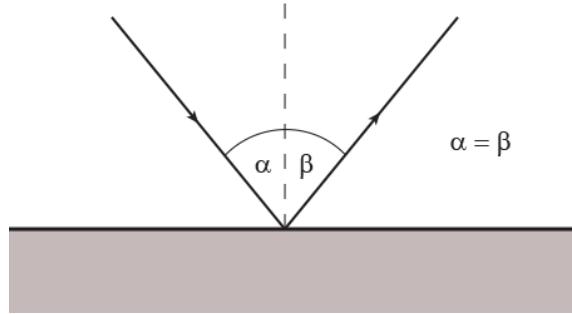
n_1 – współczynnik załamania światła ośrodka pierwszego

n_2 – współczynnik załamania światła ośrodka drugiego

1.2. ODBICIE ŚWIATŁA

Emitowana fala świetlna skierowana na powierzchnię może zostać transmitowana w głąb danego obiektu lub odbita. Odbicie światła zależy od właściwości fizycznych i optycznych danego materiału oraz kąta padania światła. Padające światło nie zawsze jest w pełni odbite od powierzchni obiektu. Wyróżnia się trzy rodzaje odbicia światła: odbicie lustrzane, odbicie rozproszone, odbicie załamane [12].

W przypadku odbicia lustrzanego fala, która została emitowana zostaje w pełni odbita od powierzchni. Nie dochodzi do wnikania światła wewnątrz obiektu. Odbicie idealne



Rys. 1.2. Odbicie fali elektromagnetycznej od powierzchni obiektu; α - kąt padania, β - kąt odbicia [11]

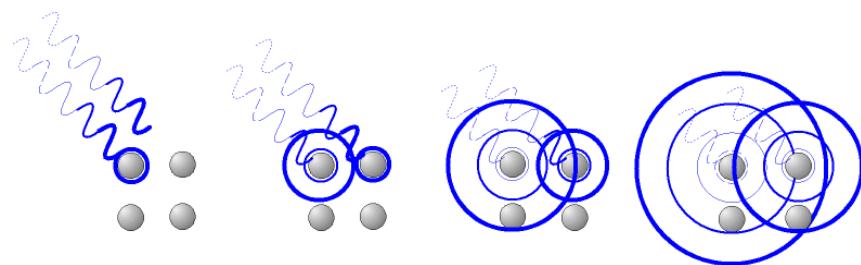
występuje na bardzo gładkich i równych powierzchniach, takich jak lustro wody. Do odbicia zwierciadlanego od powierzchni wody dochodzi gdy lustro wody jest niewzburzone.

Najczęściej występującym rodzajem odbicia jest odbicie rozproszone. W takim przypadku światło padające na powierzchnię jest rozpraszane w różnych kierunkach. Rozproszenie światła powodują powierzchnie matowe i chropowate. Taki rodzaj odbicia jest bardziej charakterystyczny dla wielu codziennych obiektów, przykładowo papier, tkaniny czy ściany.

W przypadku ośrodków przezroczystych światło może przenikać przez powierzchnię i ulegać załamaniu wewnętrz materiał, co powoduje odbicie w różnych kierunkach. Wtedy dochodzi do odbicia załamanego (rysunek 1.1) [12].

1.3. ROZPRASZANIE ŚWIATŁA

Rozproszenie światła to proces, w którym światło ulega zmianie kierunku, gdy przechodzi przez ośrodek o zmiennej gęstości lub strukturze. Fizyczna natura rozpraszania światła związana jest z jego falowym charakterem. Światło oddziałując z materią, powoduje jej drgania, co skutkuje emitowaniem wtórnego fal elektromagnetycznych, czyli promieni rozproszonych. Wyemitowane fale wtórne oddziałują na siebie, mogąc doprowadzić do interferencji rozproszonych fal [13].



Rys. 1.3. Rozproszenie fal elektromagnetycznych w wyniku oddziaływania cząsteczek materii [14]

Wyróżnia się dwa typy rozproszenia światła: sprężyste i niesprężyste. Przy rozproszeniu sprężystym nie zachodzi do zmiany energii fali świetlej, odwrotnie jest w przypadku rozproszenia niesprężystego [13].

1.4. ABSORPCJA PROMIENIOWANIA

Promieniowanie elektromagnetyczne przechodzące przez substancję ulega zmniejszeniu, w wyniku rozpraszenia oraz absorpcji. W wyniku pochłonięcia promieniowania przez materiał wzrasta jego energia wewnętrzna. Zgodnie z zasadami zachowania mechaniki kwantowej, elementarne cząstki fali świetlnej zwane fotonami oddziałują z cząsteczkami ośrodka, elektronami atomów danej substancji [15].

Nawiązując do prawa Bouguera-Lamberta, które opisuje proces absorpcji światła przez daną substancję, natężenie promieniowania maleje wykładniczo wraz ze wzrostem grubości tej warstwy. Pochłanianie fal świetlnych jest uzależnione również od współczynnika absorpcji danej substancji (równanie 1.4) [16].

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1.4)$$

gdzie:

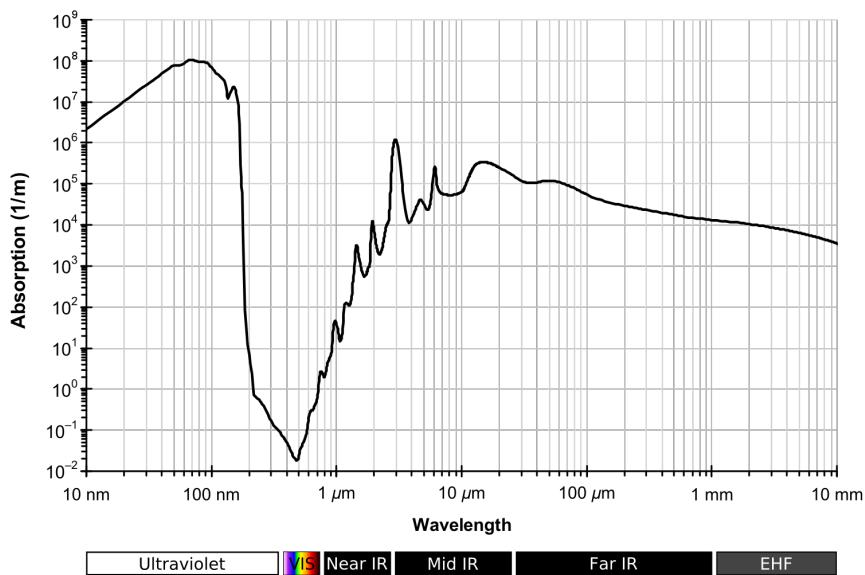
x – grubość warstwy ośrodka

$I(x)$ – natężenie światła po przejściu przez warstwę

I_0 – natężenie światła padającego

α – współczynnik absorpcji światła

e – podstawa logarytmu naturalnego



Rys. 1.4. Wykres przedstawiający zależność absorpcji światła przez wodę od długości fali [17]

Współczynnik absorpcji światła jest stały dla danej substancji o określonym składzie widmowym. Każda substancja posiada inną wartość tego współczynnika. Jednostką miary współczynnika absorpcji promieniowania jest odwrotność metra. Wartość współczynnika jest określana jako odwrotność grubości warstwy po przejściu której promienie świetlne

mają e-krotnie ($e \approx 2,7182$) mniejsze natężenie - im większy współczynnik absorpcji tym większe pochłanianie fal świetlnych . Doskonale przeźroczysty ośrodek charakteryzuje się zerowym współczynnikiem absorpcji. Wartość wskaźnika absorpcji jest zależna od długości fali elektromagnetycznych [15]. W związku tym, dana substancja może pochłaniać fale z jednego zakresu długości, natomiast fale z drugiego zakresu przepuszczać (rysunek. 1.4).

1.5. PODSUMOWANIE

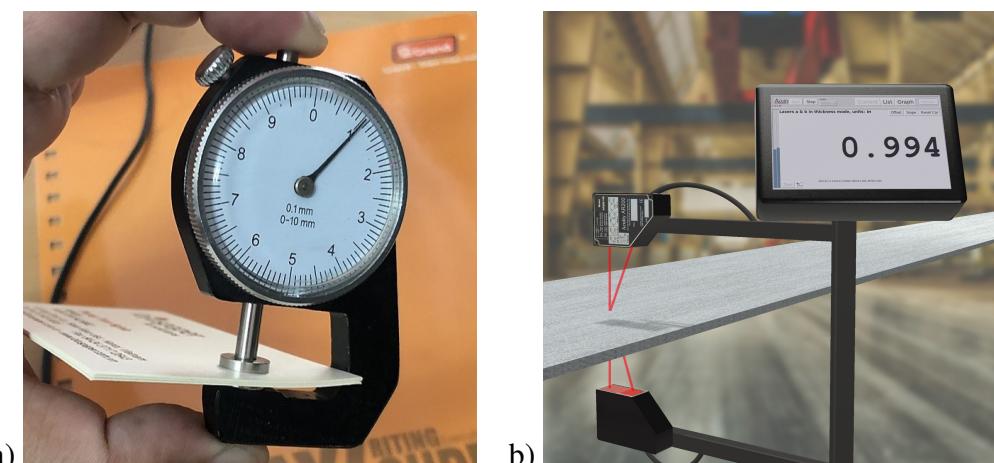
Opisane mechanizmy propagacji fal elektromagnetycznych przez substancje mają wpływ na końcowe parametry wiązki laserowej, która oddziałuje z materiałem obrabianym. Na skutek propagacji efekt końcowy obróbki laserowej może być inny niż pierwotnie zakładano. W tym celu należy dopracować kompensację odchyleń początkowych parametrów wiązki względem końcowego rezultatu. Aby to uczynić należy określić grubość warstwy materiału, który pokrywa obrabianą, docelową powierzchnię.

2. POMIAR GRUBOŚCI

Określenie pomiaru grubości polega na ustaleniu odległości pomiędzy górną a dolną powierzchnią mierzonego obiektu. Dokonując takiego pomiaru stosowane są różne przetworniki i podejścia. Należy uwzględnić, że każde z podejść może charakteryzować się inną niepewnością pomiaru. Dlatego istotny jest dobór metody pomiarowej w zależności od oczekiwanej dokładności wyniku pomiaru.

W najprostszym przypadku, jeśli istnieje swobodny dostęp do mierzonego obiektu z dwóch stron można ustalić grubość przy użyciu czujnika zegarowego (rysunek 2.1a). Taka metoda jest bardzo prosta i nie wymaga szczególnie skomplikowanych urządzeń. Czas pomiaru czujnikiem zegarowym jest wysoki względem innych rozwiązań dostępnych na rynku. Dodatkowo, metoda ta jest obarczona dużym błędem pomiarowym, ponieważ na procedurę pomiaru wpływa dużo niepożądanych czynników. Celem przedstawienia tej metody było pokazanie, że pomiar grubości jest względnie prostym pomiarem i nie wymaga skomplikowanych urządzeń. W przypadku pomiaru grubości warstwy wody zachodzi jednak konieczność zastosowania innych metod.

Jeśli jest możliwość wykonania pomiaru z dwóch stron można z powodzeniem wykorzystać różne przetworniki pomiarowe. Często wraz ze złożonością systemów pomiarowych idzie szereg korzyści jak np. lepsza dokładność pomiarowa, krótki czas pomiaru lub pomiar w sposób bezkontaktowy.



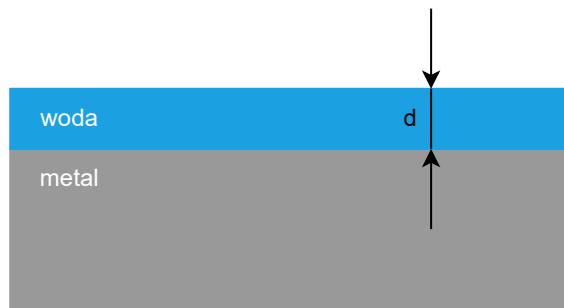
Rys. 2.1. Pomiar grubości w sposób bezpośredni; a) pomiar przy użyciu czujnika zegarowego, b) pomiar przy użyciu dwóch przeciwnie skierowanych czujników laserowych [18, 19]

Sposób przedstawiony na rysunku 2.1b przedstawia pomiar grubości materiału wykorzystując dwa sensory laserowe, które są przeciwnie skierowane. Aby określić grubość

badanego obiektu każdy sensor mierzy odległość do najbliższej powierzchni. Odległość między sensorami jest musi być znana i mieć stałą wartość. Od tej odległości należy odjąć odczytane dystanse między każdym czujnikiem a powierzchnią, w ten sposób uzyskany wynik to grubość mierzonego obiektu. Przedstawiony sposób być stosowany zarówno do pomiaru grubości materiałów transparentnych, jak również nieprzeźroczystych.

Konieczność pomiaru warstwy wody osłaniającej obrabiany element sprawia, że nie ma możliwości dokonania pomiaru z dwóch stron. Dlatego należy zastosować tylko takie metody, które nadają się do danego problemu pomiarowego (rysunek 2.2).

Wyszczególnione w dalszych częściach pracy typy sensorów muszą umożliwić zmierzenie grubości warstwy wody na podstawie pomiaru tylko z jednej strony. Dodatkowym problemem, który należy mieć na uwadze jest stan skupienia mierzonej warstwy. Ponieważ celem jest zmierzenie grubości warstwy cieczy pomiar powinien odbywać się w sposób bezkontaktowy.



Rys. 2.2. Przedstawienie problemu pomiarowego grubości warstwy wody

2.1. CZUJNIK LASEROWY TRIANGULACYJNY

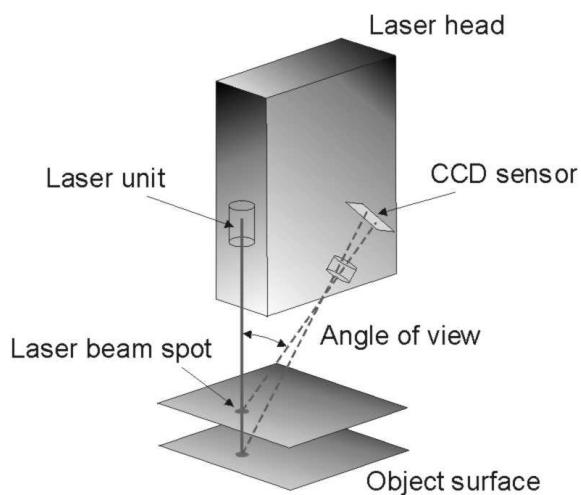
Czujnik laserowy triangulacyjny umożliwia pomiar odległości od powierzchni jak również pomiar grubości warstwy materiału, który jest transparentny dla wiązki laserowej np. woda. Do pomiaru grubości wykorzystywana jest metoda triangulacji. Triangulacja jest często używana w różnych dziedzinach do określania położenia punktu w przestrzeni przy użyciu trójkątów. Ideą triangulacji jest określenie kątów lub długości trójkąta względem punktów referencyjnych, po to aby określić położenie badanego punktu [20].

Czujnik laserowy składa się z nadajnika wiązki laserowej, najczęściej w postaci diody oraz z odbiornika, czyli matrycy CCD. Elementy te są względem siebie umiejscowione w niezmiennej pozycji, znana jest ich wzajemna odległość oraz kąt [21].

Wiązka laserowa jest transmitowana prostopadle na mierzoną powierzchnię, a następnie odbija się od niej i częściowo zostaje przechwycona przez odbiornik w postaci plamki. Matryca CCD odczytuje bieżącą pozycję plamki na przestrzeni światłoczułej. Pozycja plamki zmienia się w zależności od kąta odbicia wiązki od powierzchni, kąt odbicia wiązki jest powiązany z odlegością badanej powierzchni od nadajnika (rysunek 2.4) [21, 23].



Rys. 2.3. Czujnik laserowy triangulacyjny marki Micro Epsilon optoNCDT [22]



Rys. 2.4. Schemat obrazujący zasadę działania czujnika laserowego triangulacyjnego [24]

Nawiązując do rysunku 2.7, w wyniku zmiany odległości od badanej powierzchni zmianie ulegają wartości kątów φ oraz θ . Zarazem zmieniają się również odległości l i l' , a to przekłada się bezpośrednio na wartość parametru δ . Wartość parametru δ zostaje odczytana z matrycy odbiornika. Między odległościami l i l' zachodzi warunek opisany równaniem 2.1 [25].

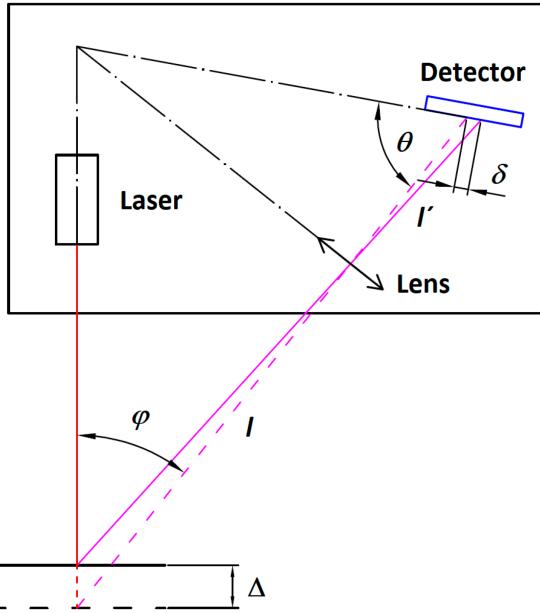
$$l \tan \varphi = l' \tan \theta \quad (2.1)$$

gdzie:

φ, θ – kąty opisane na rysunku 2.7

l, l' – odległości opisane na rysunku 2.7

Uwzględniając zależności wynikające z rysunku 2.7 można wyprowadzić równanie 2.2, które posłuży do ustalenia wymiaru Δ .



Rys. 2.5. Schemat obrazujący zasadę działania czujnika laserowego triangulacyjnego [25]

$$\delta = \frac{\Delta l' \sin \theta}{l \sin \theta \mp \Delta \sin(\varphi + \theta)} \quad (2.2)$$

gdzie:

φ, θ – kąty opisane na rysunku 2.7

l, l', Δ, δ – odległości opisane na rysunku 2.7

Ustalenie grubości odbywa się na podstawie analizy odbicia od górnej i dolnej płaszczyzny materiału. Wartość grubości jest ustalana jako różnica odległości między nadajnikiem a dolną powierzchnią względem odległości między nadajnikiem a górną powierzchnią. Możliwe jest dokonanie takiego pomiaru wykorzystując jeden czujnik laserowy triangulacyjny. Dodatkowo, należy mieć na uwadze fakt załamania światła w wyniku przechodzenia wiązki przez ośrodko o różnym współczynniku załamania światła. Wtedy należy skorygować wartości odczytywane na matrycy światłoczułej.

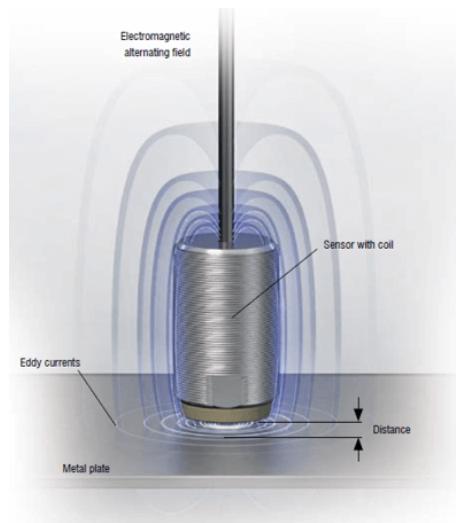
Laserowe sensory triangulacyjne wykorzystują wiązkę o spójnej, silnie skoncentrowanej postaci i w związku z tym możliwy jest pomiar o wysokiej rozdzielczości. Oprócz tego, z racji tego, że wiązka jest monochromatyczna zapewniona jest odporność na wpływ oświetlenia z otoczenia podczas dokonywania pomiaru. Czujniki laserowe charakteryzują się wysoką odpornością na warunki środowiskowe tj. zmiany wilgotności lub ciśnienia, nie występują także ograniczenia pod względem właściwości elektrycznych badanych obiektów. Niewątpliwymi zaletami są również krótki czas pomiaru (częstotliwość pomiarów wyrażana w kHz) i bezkontaktowy sposób pomiaru. Zakres pomiarowy czujników laserowych wynosi od kilku do kilkuset milimetrów, rozdzielczość pomiaru wyrażana jest w nanometrach.

Liniowość pomiaru jest zależna od zakresu pomiarowego, im większy zakres tym większa wartość wartość liniowości [23].

Istotnym problemem dotyczącym czujników laserowych jest konieczność zachowania dobrej widoczności między nadajnikiem wiązki a detektorem. Na rezultat pomiarów źle wpływa obecność pyłów bądź zadymienie. Układ optyczny czujnika powinien być wolny od zanieczyszczeń. Na dokładność pomiarów wpływa obecność drgań, im większa ich amplituda tym mniej dokładna wartość pomiaru [21, 23].

2.2. UKŁAD CZUJNIKA WIROPRĄDOWEGO Z CZUJNIKIEM LASEROWYM TRIANGULACYJNYM

Czujnik wiroprowadowy posiada rdzeń na który jest nawinięta cewka i przepływa przez nią prąd przemienny o wysokiej częstotliwości. To sprawia, że wokół cewki tworzy się zmienne, wysokoczęstotliwościowe pole magnetyczne. Gdy sensor zostaje zbliżony do elementu metalowego indukuje się w tym metalu prąd przemienny. Zaindukowany prąd wirowy skutkuje powstaniem pola magnetycznego o przeciwnym zwrocie, układ pomiarowy odczytuje prąd pochodzący z tego pola [26].



Rys. 2.6. Schemat przedstawiający zasadę działania czujnika wiroprowadowego [27]

Na podstawie wyznaczonej różnicy prądów wyznaczona jest wartość wypadkowa prądu. Wtedy z zależności prąd-dystans można określić dystans od czujnika wiroprowadowego do dolnej powierzchni mierzonej warstwy [26].

Wykorzystanie czujnika wiroprowadowego nie pozwala na bezpośredni pomiar grubości warstwy wody, gdyż nie ma możliwości bezpośredniego przyłożenia czujnika do górnej powierzchni badanej warstwy. Dlatego należy ustalić odległość od czujnika do górnej powierzchni warstwy, można do tego użyć sensora laserowego triangulacyjnego. Na podstawie zmierzonej odległości czujnikiem wiroprowadowym (odległość do dolnej powierzchni) i odle-

głości zmierzonej czujnikiem laserowym triangulacyjnym (odległość wyłącznie do górnej powierzchni) można ustalić grubość warstwy wody (rys. 2.7). Do pomiaru należy również uwzględnić położenie względne czujnika wiroprowadowego i laserowego triangulacyjnego (równanie 2.3).

$$d = d_2 - d_1 - d_0 \quad (2.3)$$

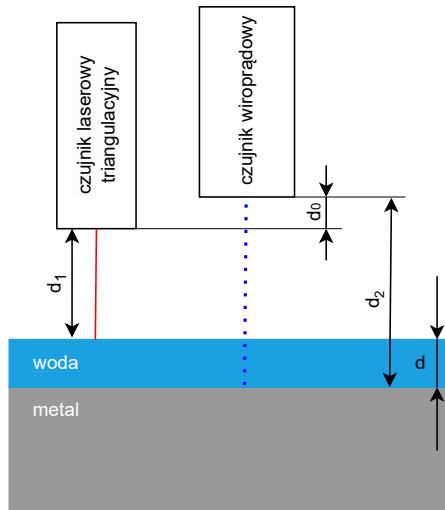
gdzie:

d – grubość badanej warstwy

d_0 – odległość między czujnikiem laserowym triangulacyjnym i wiroprowadowym

d_1 – odległość między czujnikiem laserowym triangulacyjnym a górną powierzchnią

d_2 – odległość między czujnikiem wiroprowadowym a dolną powierzchnią



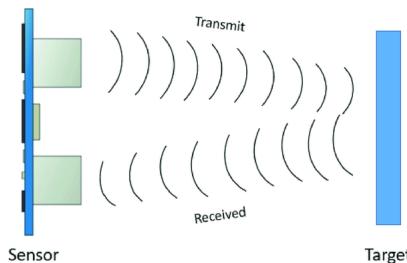
Rys. 2.7. Schemat obrazujący układ pomiaru grubości warstwy wody z użyciem czujnika laserowego triangulacyjnego oraz czujnika wiroprowadowego

Czujniki wiroprowadowe charakteryzują się wysoką rozdzielczością i liniowością. Zapewniają również wysoką częstotliwość pomiarów, jednocześnie zachowując zdolność do pomiarów w szerokim zakresie temperatur. Ważną cechą jest odporność na czynniki zewnętrzne, gdyż sensory wiroprowadowe są odporne na kurz, olej, wilgoć, pyły. Istotną wadą czujnika wiroprowadowego jest możliwość ustalania odległości tylko od obiektów które przewodzą prąd [28].

2.3. CZUJNIK ULTRADŹWIĘKOWY

Sensor ultradźwiękowy wykorzystuje właściwość, że prędkość dźwięku w powietrzu wynosi około 343 metrów na sekundę. Rozpoczęcie pomiaru odbywa się poprzez wy-

emitowanie ultradźwięku, fala dźwiękowa po napotkaniu na obiekt ulega odbiciu i wraca do odbiornika. Na tej podstawie znając czas emisji i powrotu fali dźwiękowej można wyznaczyć odległość od obiektu [29].



Rys. 2.8. Schemat obrazujący pomiar grubości warstwy wody z użyciem czujnika ultradźwiękowego [30]

Z zależności 2.4 wyznacza się dystans od czujnika do powierzchni obiektu. Wartość jest dzielona przez 2, ponieważ czas całkowity podstawiany do równania obejmuje czas od transmisji do odbicia się od powierzchni oraz powrót fali z powrotem do odbiornika [29].

$$d = \frac{t \cdot c}{2} \quad (2.4)$$

gdzie:

d – dystans

t – czas od emisji dźwięku do jego odbioru

c – prędkość dźwięku

W przypadku pomiarów grubości czujnikami ultradźwiękowym należy dysponować przetwornikiem o wysokiej częstotliwości odświeżania. Sensor musi przetworzyć zarówno falę odbijającą się od górnej powierzchni badanej warstwy, a następnie przetwarza drugą falę, która została odbita od dolnej powierzchni (rys. 2.8). Na podstawie ustalonych odległości można określić grubość warstwy. Należy jednak uwzględnić konieczność kalibracji pod pomiar grubości danego materiału, gdyż każdy materiał charakteryzuje się inną prędkością rozchodzenia się dźwięku, co bezpośrednio przekłada się na uzyskane rezultaty pomiaru.

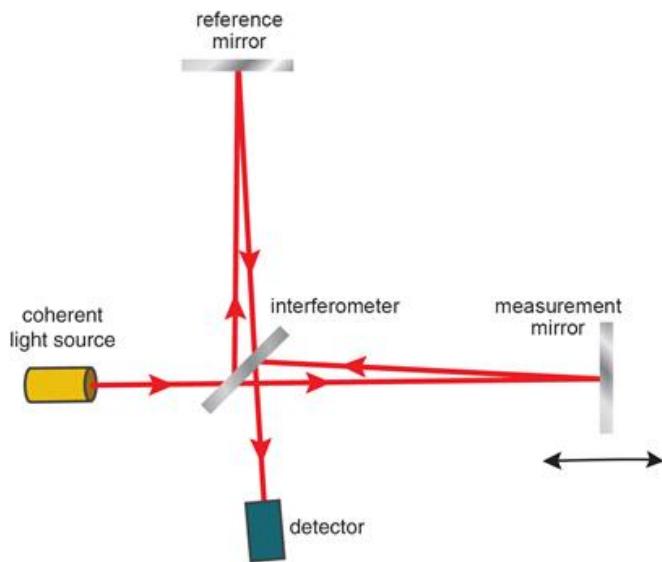
Czujnik ultradźwiękowy zapewnia bezkontaktowy pomiar niezależnie od materiału, powierzchni, koloru lub przezroczystości. Ponadto może dokonywać pomiarów w środowiskach zakurzonych, zawilgoconych i nie ulega wpływom zewnętrznego światła. Charakteryzuje się również dużymi zakresami pomiarowymi. W przypadku próby pomiaru niewielkich elementów mogą wystąpić problemy z ustaleniem odległości przy użyciu czujnika ultradźwiękowego [31].

2.4. INTERFEROMETRIA

Interferometr jest przyrządem pomiarowym, który mierzy odległość na podstawie zjawiska interferencji fal. Interferencja polega na nakładaniu się dwóch lub większej ilości fal, w wyniku czego powstaje nowa fala o wzmacnionej lub wygaszonej amplitudzie. Warunkiem zachodzenia interferencji jest spójność fal pod względem fazy oraz zachowanie tej samej częstotliwości. Obserwując wynik interferencji fal dokonuje się pomiaru odległości bądź grubości.

Najczęściej używanym urządzeniem interferometrycznym jest interferometr Michelsona. W interferometrze Michelsona, w wyniku przejścia promieni przez półprzeźroczyste zwierciadło, dochodzi do rozdzielenia pojedynczej wiązki laserowej na dwie oddzielne wiązki. Każda z wiązek ma inny tor. Jedna z wiązek odbija się od zwierciadła referencyjnego, zaś druga jest odbijana od mierzonej powierzchni. Przed dojściem do detektora rozdzielone wiązki są ponownie złączane w wyniku transmisji światła na odpowiednio ustawione zwierciadło półprzeźroczyste. Złączona wiązka jest transmitowana na matrycę detektora.

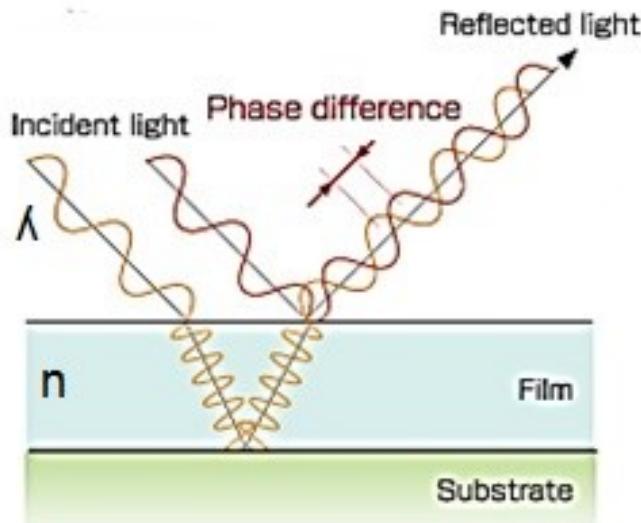
Z racji wystąpienia różnicy w przebytej odległości przez każdą wiązkę zachodzi przesunięcie fazowe pomiędzy nimi. Odczytane wartości przez matrycę detektora są odpowiednio przetwarzane przez oprogramowanie, by na podstawie interferowanych wiązek określić odległość [32].



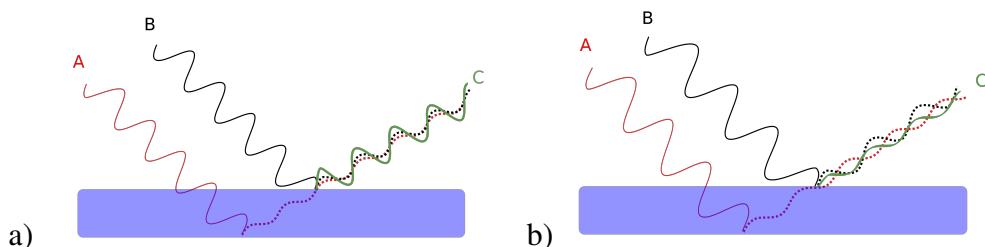
Rys. 2.9. Schemat przedstawiający szczegółową budowę interferometru Michelsona [33]

Pomiar grubości materiału przy użyciu interferometru odbywa się przez ustalenie odległości od górnej i dolnej powierzchni. Na podstawie różnicy zbadanych dystansów ustala się grubość warstwy materiału. Bardziej problematyczny jest pomiar odległości od dolnej powierzchni. W wyniku transmisji wiązki wgłęb materially dochodzi do załamania

światła, a następnie wiązka jest odbijana od dolnej powierzchni (rysunek 2.10). Grubość warstwy materiału jest ustalana na podstawie interferencji odbitych fal (rysunek 2.11) [34].



Rys. 2.10. Przedstawienie przebiegu odbicia emitowanych fal świetlnych w celu określenia grubości warstwy materiału [35]



Rys. 2.11. Przykłady interferencji fal zachodzących po odbiciu od badanych warstw materiału; a) interferencja konstruktywna, b) interferencja destruktynwa [36]

Pomiary interferometrem charakteryzują się tym, że odbywają się w sposób bezkontaktowy, nieniszczący mierzonego obiektu. Dodatkowo, pomiary interferometrem są wysoce dokładne, przez co oprócz pomiarów odległości można zbadać też kształt danego obiektu. Rozdzielcość jest określana na poziomie pojedynczych nanometrów.

Pod względem wad, interferometr jest przyrządem stosunkowo złożonym, który wymaga odpowiedniej regulacji i konserwacji. Interferometry są również wysoce wrażliwe na czynniki zewnętrzne takie jak wibracje, wilgotność, zmiany temperatury. Nie należy dokonywać nimi pomiarów w środowiskach wysoce zanieczyszczonych. Ponadto, w celu zapewnienia stabilnego pomiaru interferometry wymagają stabilnego źródła światła. Są również bardzo czułe na zakłócenia zewnętrzne w postaci promieniowania słonecznego. Wadą jest również mały zakres pomiarowy urządzenia ograniczający się do zaledwie kilku milimetrów.

W przemyśle najczęściej używa się interferometrów wykorzystujących do pomiaru światło białe. Szczególną metodą pomiaru wykorzystującą interferometrię jest optyczna koherentna tomografia (OCT), która służy do wykonywania badań w medycynie. OCT wykorzystuje źródło światła o dużej koherencji, takie jak laser. Światło emitowane przez laser jest skierowane na badaną tkankę, a odbite fale świetlne są zbierane i analizowane za pomocą interferometru. Możliwe jest generowanie dwu- i trójwymiarowych obrazów tkanek o wysokiej szczegółowości. Odwzorowane obrazy tkanek pozwalają na dokładną analizę i dobór leczenia [37].

2.5. ELIPSOMETRIA

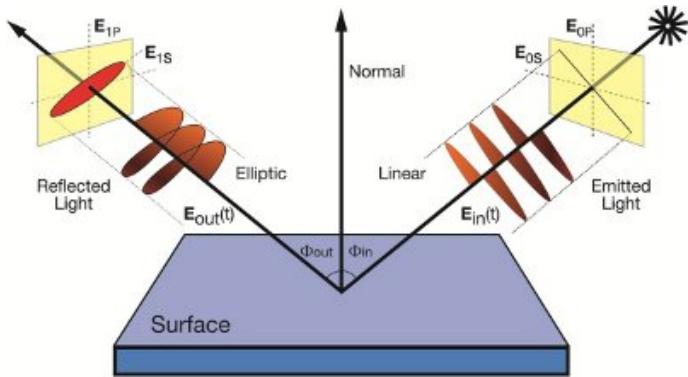
Elipsometr jest przyrządem, który umożliwia dokonanie pomiaru grubości warstwy wykonanej z danego materiału. Dodatkowo możliwe jest również ustalenie innych parametrów optycznych warstwy np. współczynnik załamania światła. Badanie odbywa się w sposób bezkontaktowy, nieniszczący.



Rys. 2.12. Przyrząd elipsometryczny służący do pomiaru grubości materiału [38]

Metoda pomiaru grubości polega na analizie zmiany polaryzacji światła podczas jego przejścia przez ośrodek, dokonuje się pomiaru przesunięcia fazowego wiązki światła przechodzącej przez strukturę warstwową. Pod kątem do badanej powierzchni, emitowane jest światło o znanej polaryzacji, które następnie odbija się i zostaje przechwycone przez detektor, który mierzy stan polaryzacji światła odbitego od próbki (rys 2.13) [39].

Zmiana stanu polaryzacji w wyniku odbicia od próbki określa się stosunkiem współczynnika odbicia próbki dla światła spolaryzowanego p do współczynnika odbicia próbki dla światła spolaryzowanego s . Stosunek ten jest oznaczany literą ρ . Innym sposobem zadeklarowania stosunku współczynników odbicia jest zapis w postaci parametrów elipsometrycznych [39, 41].



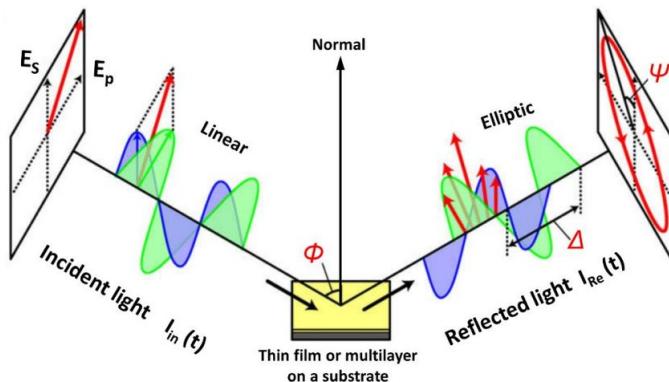
Rys. 2.13. Zasada działania elipsometru [40]

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \tan(\psi) e^{i \cdot \Delta} \quad (2.5)$$

gdzie:

- ρ — stosunek współczynników odbicia próbek dla światła spolaryzowanego p i s
- R_p — współczynnik odbicia próbki dla światła spolaryzowanego p
- R_s — współczynnika odbicia próbki dla światła spolaryzowanego s
- $\tan(\psi)$ — wielkość współczynnika odbicia dla światła spolaryzowanego p i s
- Δ — różnica fazowa pomiędzy odbitym światłem spolaryzowanym

Nawiązując do rysunku 2.14 można przyjąć, że fala w kolorze zielonym to światło spolaryzowane p , a fala w kolorze niebieskim to światło spolaryzowane s .



Rys. 2.14. Zasada działania elipsometru, przedstawienie składowych parametrów pomiarowych na schemacie [42]

Elipsometr jest przyrządem, który charakteryzuje się wysoką dokładnością pomiaru na poziomie tysięcznych części nanometra. Jego zakres pomiarowy określany jest w mikrometraх.

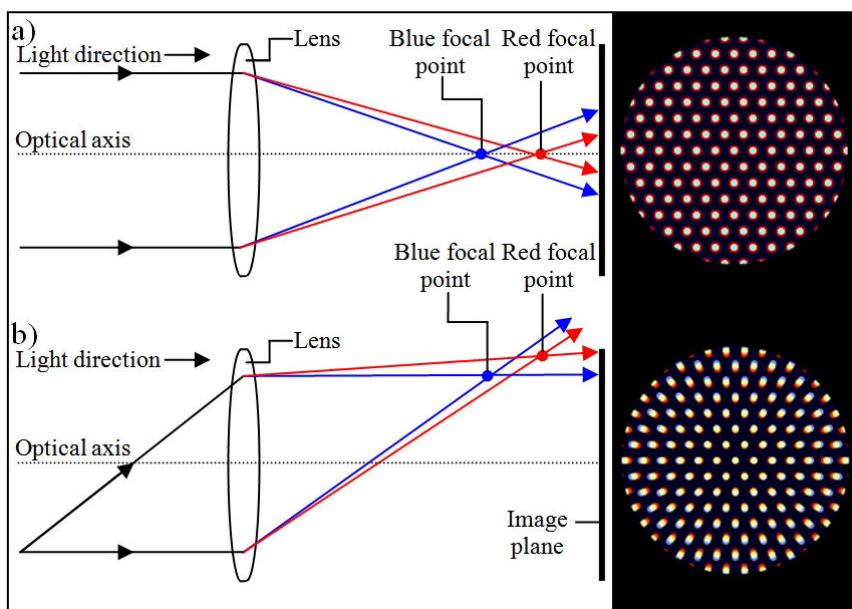
2.6. KONFOKALNY CZUJNIK CHROMATYCZNY

2.6.1. Aberracja chromatyczna

Doskonały układ optyczny, który odwzorowuje obraz bez błędów jest nieosiągalny w praktyce. Wysoce dokładne odwzorowanie obrazu jest możliwe tylko w wąskich zakresach spektralnych. Rzeczywiste układy są niedoskonałe, a odwzorowane obrazy obarczone błędami są nazywane aberracjami. Aberracja chromatyczna jest zjawiskiem występującym w systemach optycznych, występuje na skutek dyspersji materiału danego obiektu optycznego. Zjawisko to jest określone jako niepożądane.

Na układ optyczny kierowana jest wiązka szerokospektralna. Na skutek zmiany ośrodka promienie światła ulegają załamaniu, zależnie od długości fali pod różnym kątem. Wraz ze wzrostem długości fali wzrasta kąt załamania światła (teoria przedstawiona w rozdziale 1.1). W przypadku soczewki skupiającej zachodzi ogniskowanie w różnej odległości od soczewki, zależnie od długości fali. Dochodzi do rozszczepienia ognisk.

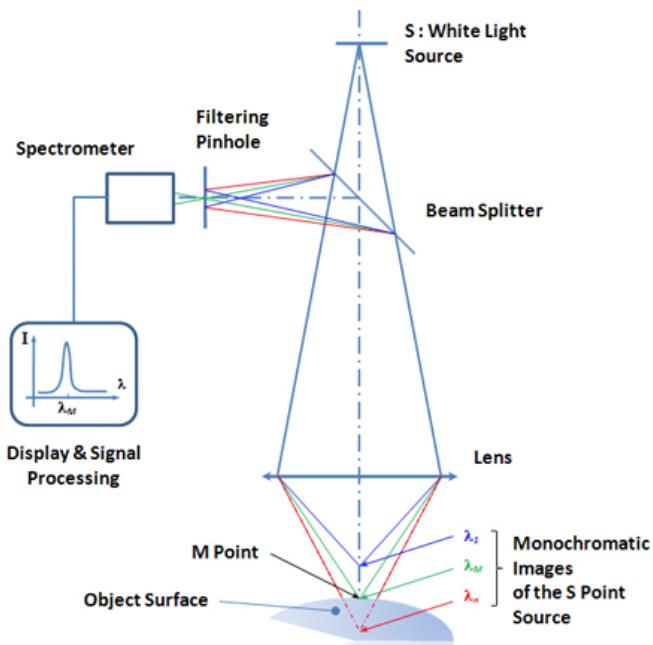
W praktyce występują dwa rodzaje aberracji chromatycznej: podłużna i poprzeczna. Aberracja chromatyczna podłużna zachodzi, gdy szerokospektralna wiązka światła jest kierowana na soczewkę równolegle do jej osi optycznej. Wtedy załamane promienie światła ogniskują się na osi optycznej, lecz w różnej odległości od soczewki. Z kolei aberracja chromatyczna poprzeczna ma miejsce, gdy promienie są skierowane pod kątem do wspomnianej osi optycznej soczewki [43, 44].



Rys. 2.15. Aberracja chromatyczna zachodząca w ognisku soczewki - a) podłużna, b) poprzeczna [45]

2.6.2. Budowa i zasada działania konfokalnego czujnika chromatycznego

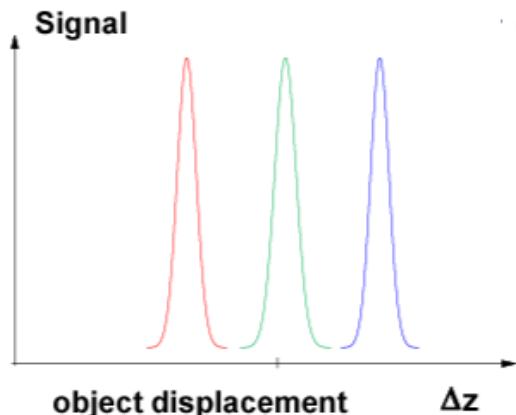
Wykorzystując zjawisko aberracji chromatycznej podłużnej, konfokalne czujniki chromatyczne dokonują pomiaru odległości w sposób bezkontaktowy i nieniszczący obiektu. Konfokalny czujnik chromatyczny składa się z następujących elementów: źródła emittującego światło białe (*ang. white light source*), dzielnika wiązki (*ang. beam splitter*), układu chromatycznego (*ang. chromatic lens*) i spektrometru (*ang. spectrometer*), który jest detektorem czujnika (rysunek 2.16).



Rys. 2.16. Schemat przedstawiający budowę konfokalnego czujnika chromatycznego [46]

Ze źródła emitowane jest światło białe, którego promienie kierowane są na dzielnicę wiązki. Jego zadaniem jest skierowanie wiązki świetlnej na układ chromatyczny, najczęściej soczewkę skupiającą. Zadaniem soczewki jest rozszczepienie wiązki świetlnej na pojedyncze fale o różnych długościach. Wtedy fale ogniskują się na osi optycznej układu chromatycznego w różnej odległości. Teoretycznie, w wyniku zjawiska aberracji, na powierzchni obiektu względem którego ustalana jest odległość, dochodzi do zogniskowania się fal tylko o tej samej długości. Pozostała część wiązki nie jest zogniskowana na tym obiekcie. Promienie odbijają się od powierzchni, lecz tylko zogniskowane fale kierowane są z powrotem do układu optycznego. Po przejściu przez soczewkę, w wyniku odbicia fal przez dzielnicę wiązki są one skierowane do detektora czujnika. Spektrometr najczęściej odczytuje widma w postaci charakterystycznych pików, które odpowiadają wysokiej intensywności dla zogniskowanych fal o identycznej długości (rysunek 2.17) [47].

Często przed detektorem sensora stosowana jest płytka cylindryczna o małej średnicy. Zadaniem płytka jest odfiltrowanie szumów świetlnych, które mogą zakłócać odczyty spektrometru.



Rys. 2.17. Przykładowe wartości odczytywane przez detektor czujnika chromatycznego, każda krzywa przedstawia inną odległość od powierzchni

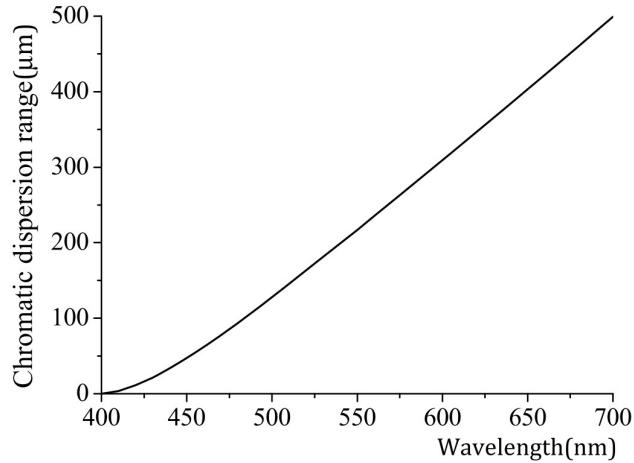
W teorii, gdyby średnica otworu płytka była nieskończona mała, detektor czujnika powinien odnotować spektrum w postaci delty Diraca [47, 48].

Konfokalny czujnik chromatyczny musi mieć zdefiniowaną krzywą kalibracyjną. Krzywą wyznacza się poprzez zebranie serii pomiarów, na podstawie których tworzy się zależność długości fali względem odległości. Równanie krzywej jest wyznaczone przez wykonanie regresji liniowej na uzyskanym zbiorze punktów. Dokonując pomiaru detektor określa długość zogniskowanych fal, czyli tych o maksymalnej intensywności. Ostateczna wartość odległości jest odczytana z krzywej kalibracyjnej, na podstawie ustalonej długości fal.

2.6.3. Pomiar grubości materiału transparentnego na podstawie wyznaczenia parametrów układu optycznego

Nawiązując do artykułu [49], autorzy przedstawiają możliwość dokonania pomiaru grubości materiału transparentnego do którego dostęp jest tylko od strony górnej jego powierzchni. Może to warstwa ciecza pokrywająca powierzchnię metalowej płyty. W celu dokonania pomiaru grubości należy wyznaczyć współczynnik k , który określa na jakim dystansie wzduż osi optycznej jest ogniskowana fala o wyszczególnionej długości. Współczynnik k jest wyznaczany w jednostce $\mu\text{m}/\text{nm}$.

Na podstawie wyznaczonego wykresu (rysunek 2.18) można stwierdzić, że zależność jest liniowa, a zakres ogniskowanych fal w wyniku aberracji mieści się między 400-700 nm. Wartości na osi Y wskazują zakres pomiarowy czujnika. Zgodnie z lewą częścią rysunku 2.19 zakres dyspersji można określić jako równanie 2.6.



Rys. 2.18. Wykres przedstawiający zależność między odległością w zakresie ogniskowanej dyspersji chromatycznej a długością fali [49]

$$h_1 = k \cdot (\lambda - \lambda_1) \quad (2.6)$$

gdzie:

h_1 – zakres zogniskowanych promieni w wyniku aberracji

k – współczynnik określający dystans ogniskowania fali o długości 1 nm

λ, λ_1 – brzegowe długości fali danego zakresu spektralnego

Wyżej opisane parametry są wyznaczane przed dokonywaniem pomiarów grubości badanej warstwy. Wartość współczynnika k jest zależna od parametrów soczewki układu optycznego. Po umieszczeniu badanej próbki w zakresie pomiarowym czujnika zakres spektralny zmienia swoją wartość na $h_1 + h_2$ zgodnie z równaniem 2.7.

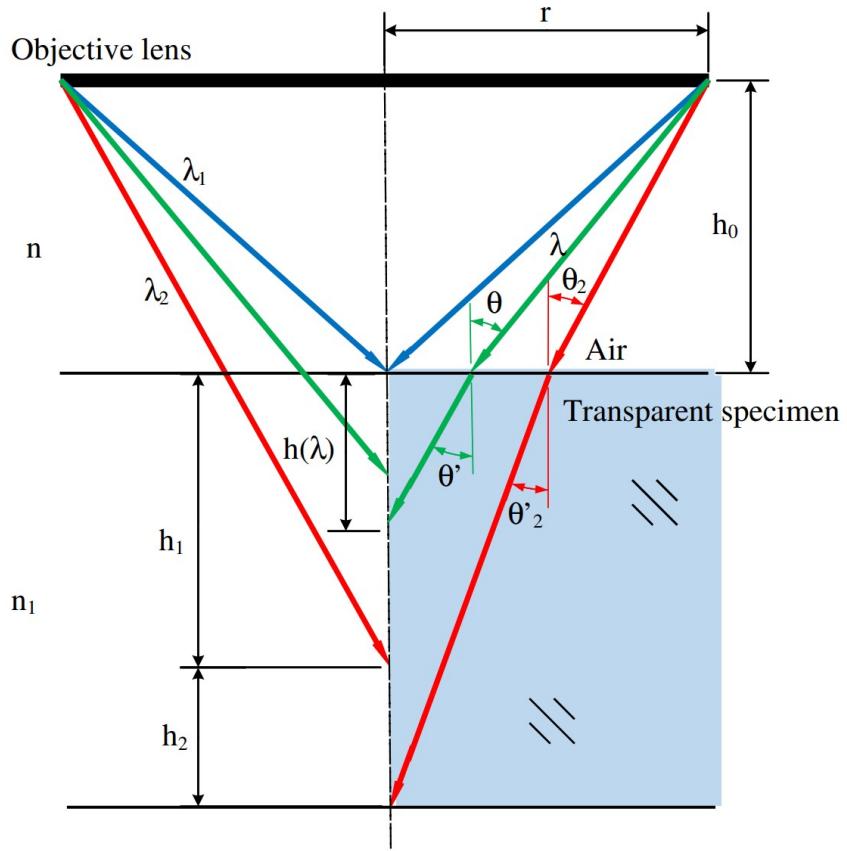
$$h_1 + h_2 = \frac{r - h_0 \cdot \tan \theta_2}{\tan \theta'_2} \quad (2.7)$$

Między kątami θ_2 i θ'_2 zachodzi zależność opisana równaniem 2.8.

$$n \cdot \sin \theta_2 = n_1 \cdot \sin \theta'_2 \quad (2.8)$$

Kąt θ_2 zostaje wyliczony na podstawie zależności wynikającej z pierwotnego zakresu dyspersji chromatycznej (równanie 2.9). Dystans h_0 wyznacza się zgodnie z wcześniejszą opisaną pomiaru odległości.

$$\theta_2 = \arctan \frac{r}{h_0 + h_1} \quad (2.9)$$



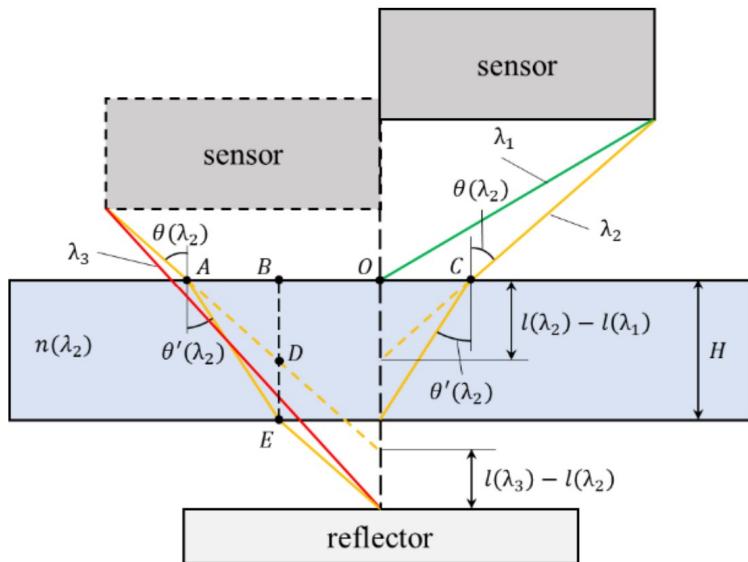
Rys. 2.19. Szczegółowy schemat przedstawiający cechy geometryczne zakresu ogniskowanych promieni w wyniku aberracji chromatycznej; r - promień soczewki skupiającej, n - współczynnik załamania światła dla powietrza, n_1 - współczynnik załamania światła materiału transparentnego, θ_2 - kąt wypadkowy fali o długości λ_2 , θ'_2 - kąt załamania fali o długości λ_2 , θ - kąt wypadkowy fali o długości λ , θ' - kąt załamania fali o długości λ , h_0 - odległość między najwyższą ogniskową a soczewką, h_1 - pierwotny zakres dyspersji chromatycznej, h_2 - dystans między najniższą ogniskową przed załamaniem i najniższą ogniskową po załamaniu [49]

Zestawiając równania 2.8 i 2.9 wyznaczona zostaje kolejna zależność 2.10.

$$h_1 + h_2 = \frac{r \cdot h_1}{(h_0 + h_1) \cdot \tan \left[\arcsin \frac{n \cdot \sin(\arctan \frac{r}{h_0 + h_1})}{n_1} \right]} \quad (2.10)$$

Po uwzględnieniu równań 2.6 oraz 2.10 zostaje wyznaczony końcowy wzór umożliwiający wyliczenie grubości warstwy 2.11. W tym przypadku niewiadomymi są odległość h_0 , którą można bezpośrednio ustalić oraz długość zogniskowanej fali λ na powierzchni mierzonego detalu, która jest odczytywana z maksymalną intensywnością przez detektor czujnika chromatycznego.

$$h(\lambda) = \frac{r \cdot k \cdot (\lambda - \lambda_1)}{(h_0 + k \cdot (\lambda - \lambda_1)) \cdot \tan \left[\arcsin \frac{n \cdot \sin(\arctan \frac{r}{h_0 + k \cdot (\lambda - \lambda_1)})}{n_1} \right]} \quad (2.11)$$



Rys. 2.20. Szczegółowy schemat przedstawiający metodę pomiaru grubości wykorzystującą zewnętrzny reflektor; H - grubość badanej próbki, n - współczynnik załamania światła danego ośrodka, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - poszczególne promienie o danych długościach fal, $\theta(\lambda_1), \theta(\lambda_2), \theta(\lambda_3)$ - kąty załamania danych fal, $\theta'(\lambda_1), \theta'(\lambda_2), \theta'(\lambda_3)$ - kąty wypadkowe załamania danych fal [50]

2.6.4. Pomiar grubości materiału transparentnego z użyciem reflektora

Autorzy artykułu [50] przedstawiają technikę pomiaru grubości czujnikiem chromatycznym, która wymaga zastosowania reflektora obijającego promień światła emitowanego przez czujnik. Z tego powodu konieczny jest dostęp do badanego materiału z dwóch stron. Dodatkowo, istotne jest dokonanie pomiaru zgodnie z ustaloną procedurą.

Na podstawie rysunku 2.20 zostaje ustalone równanie 2.12, 2.13.

$$\tan \theta(\lambda_2) = \frac{l_{OC}}{l(\lambda_2) - l(\lambda_1)} \quad (2.12)$$

gdzie:

l_{OC} – odległość między punktami OC opisana na rysunku 2.20

$$\tan \theta'(\lambda_2) = \frac{l_{OC}}{H} \quad (2.13)$$

Na postawie równań 2.12 oraz 2.13 określa się zależność 2.14.

$$H = \frac{[l(\lambda_2) - l(\lambda_1)] \tan \theta(\lambda_2)}{\tan \theta'(\lambda_2)} \quad (2.14)$$

Po lewej stronie rysunku 2.20 przyjęto taką pozycję reflektora, że fala λ_2 po transmisji przez transparentny materiał zostaje skupiony na powierzchni reflektora. Po usunięciu badanego materiału przeźroczystego zmieniony zostaje współczynnik załamania światła

a na powierzchni reflektora ogniskuje się promień λ_3 . Z analizy geometrycznej wynikają równania 2.15 i 2.16.

$$\tan \theta(\lambda_2) = \frac{l_{AB}}{H - l_{DE}} \quad (2.15)$$

$$\tan \theta'(\lambda_2) = \frac{l_{AB}}{H} \quad (2.16)$$

Ponadto, wynika z rysunku 2.20 również równanie 2.17.

$$l_{DE} = l(\lambda_3) - l(\lambda_2) \quad (2.17)$$

Kolejno na podstawie zależności 2.15, 2.16, 2.17 można wyznaczyć kolejną 2.18.

$$H = \frac{[l(\lambda_3) - l(\lambda_2)] \tan \theta(\lambda_2)}{\tan \theta(\lambda_2) - \tan \theta'(\lambda_2)} \quad (2.18)$$

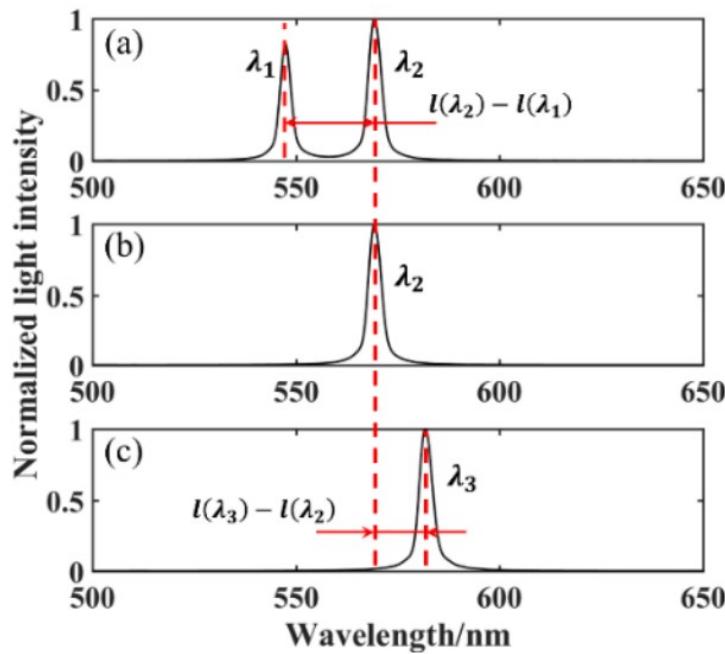
Korzystając z zależności 2.14 i 2.18 ustalone zostaje końcowe równanie 2.19

$$H = l(\lambda_3) - l(\lambda_1) = l(\lambda_3) - l(\lambda_2) + l(\lambda_2) - l(\lambda_1) \quad (2.19)$$

W odniesieniu do wyprowadzonych wzorów należy ustalić wartości $l(\lambda_2) - l(\lambda_1)$ oraz $l(\lambda_3) - l(\lambda_2)$ by móc ustalić wartość $l(\lambda_3) - l(\lambda_1)$, która równa się badanej grubości materiału H . Ustalenie powyższych wartości odbywa się przez wykonanie konkretnej procedury pomiaru.

W pierwszym kroku, zgodnie z rysunkiem 2.21a detektor czujnika przechwytuje spektrum z dwoma pikami, które powstały w wyniku odbicia się wiązki od przedniej i tylnej powierzchni badanego materiału. W kolejnym etapie następuje przemieszczenie czujnika, aby zogniskować wiązkę na powierzchni reflektora po przejściu przez badany materiał (2.21b). Następuje odczyt długości fali, która została zogniskowana. Dalej zostaje usunięty materiał transparentny, a charakterystyczny pik wykresu przesuwa się (rysunek 2.21c). Zostaje odczytana długość fali dla odnotowanego piku i ustalona wartość $l(\lambda_3) - l(\lambda_2)$. Tym sposobem dochodzi do ustalenia grubości materiału H , bazując na równaniu 2.19.

Dostępne na rynku konfokalne czujniki chromatyczne są kompaktowych rozmiarów co umożliwia ich szerokie zastosowanie. Ze względu na niewielkie rozmiary i niską wagę można takie sensory zintegrować z ramionami robotów przemysłowych. Zaletą tego typu sensora jest zdolność do dokonywania szybkich i dokładnych pomiarów z dokładnością do nanometrów. Średnica plamki pomiarowej czujnika jest stała. Możliwe jest dokonywanie pomiarów na powierzchniach różnego typu np. szkło, guma. Zakresy pomiarowe czujników konfokalnych wynoszą najczęściej kilkanaście do kilkudziesięciu milimetrów. Zastosowanie czujnika konfokalnego wymaga środowiska wolnego od zanieczyszczeń, bo może to uniemożliwić dokonywanie pomiarów. Bardzo często odseparowanie czujnika od jed-



Rys. 2.21. Procedura wyznaczania wartości $I(\lambda_2) - I(\lambda_1)$ oraz $I(\lambda_3) - I(\lambda_2)$; a) fale zogniskowane na przednią i tylną powierzchnię materiału, b) fale zogniskowane na powierzchni reflektora po przejściu przez materiał transparentny, c) fale zogniskowane na bezpośrednio powierzchni reflektora po usunięciu materiału [50]

nostki sterującej, co wymusza stosowanie odpowiedniego oprzyrządowania. To może zostać postrzegane jako zaleta lub wada, w zależności od konkrentego przypadku.

2.7. PODSUMOWANIE

Parametry opisywanych czujników mogą być podobne lub różnić się w zależności od rodzaju. W celu porównania została stworzona tabela 2.1 zestawiająca parametry sensorów, aby móc finalnie przyrównać badane rozwiązań do opcji dostępnych na rynku [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60].

Tabela 2.1. Tabela zawierająca parametry przykładowo wybranych opisanych rodzajów czujników

Nazwa	Zakres	Rozdzielcość	Liniowość	Częstotliwość pomiaru
Czujnik laserowy triangulacyjny Turck LM80KIQP	40-80 mm	2 μm	0,05 %	do 2 kHz
Czujnik laserowy triangulacyjny MicroEpsilon optoNCDT 1900LL	2-50 mm	0,1 μm	0,02 %	do 10 kHz
Czujnik laserowy triangulacyjny Sick OD5-85	65-105 mm	1 μm	0,08 %	do 10 kHz
Czujnik wiopradowy MicroEpsilon DT3001-U2-A-SA	do 2 mm	4 μm	0,60 %	do 5kHz
Czujnik wiopradowy ECL 101	do 15 mm	8 μm	0,50 %	do 10 kHz
Czujnik ultradźwiękowy Pepperl+Fuchs UC4000-L2-I-V15 - 277770	200-4000 mm	400 μm	0,20 %	do 85 kHz
Czujnik ultradźwiękowy Balluff BUS007F	30-350 mm	69 μm	0,15 %	do 25 kHz
Czujnik interferometryczny MicroEpsilon IMS5400-TH	do 45 mm	1 nm	0,05 %	do 6kHz
Czujnik elipsometryczny Gartner L115S-8	do 6 μm	0,3 nm	0,005 %	-
Czujnik konfokalny chromatyczny MicroEpsilon confocalDT IFS2404	do 2 mm	0,04 μm	0,01 %	do 1 kHz

3. IMPLEMENTACJA APLIKACJI

3.1. WYBÓR JĘZYKA PROGRAMOWANIA, KONFIGURACJA ŚRODOWISKA URUCHOMIENIOWEGO I KOMUNIKACJA Z PERYFERIAMI

Jednym z założeń wdrażanego oprogramowania było zapewnienie użytkownikowi końcowemu możliwości podglądu danych rzeczywistych i sterowania peryferiami budowanego czujnika. Z tego powodu zdecydowano się na stworzenie aplikacji okienkowej korzystając z biblioteki WinForms. Jest to biblioteka wbudowana umożliwiająca tworzenie takich aplikacji w ramach platformy Microsoft .NET Framework, wspierającej pisanie programów w języku programowania C# [61].

Ponadto producenci urządzeń peryferyjnych, spektrometru oraz platformy laboratoryjnej, dostarczają biblioteki do zastosowań deweloperskich, które obsługują te urządzenia w celutworzenia dedykowanego oprogramowania. Język programowania C# jest językiem kompilowanym, wieloparadygmatowym umożliwiającym tworzenie aplikacji przy użyciu paradygmatu obiektowego.

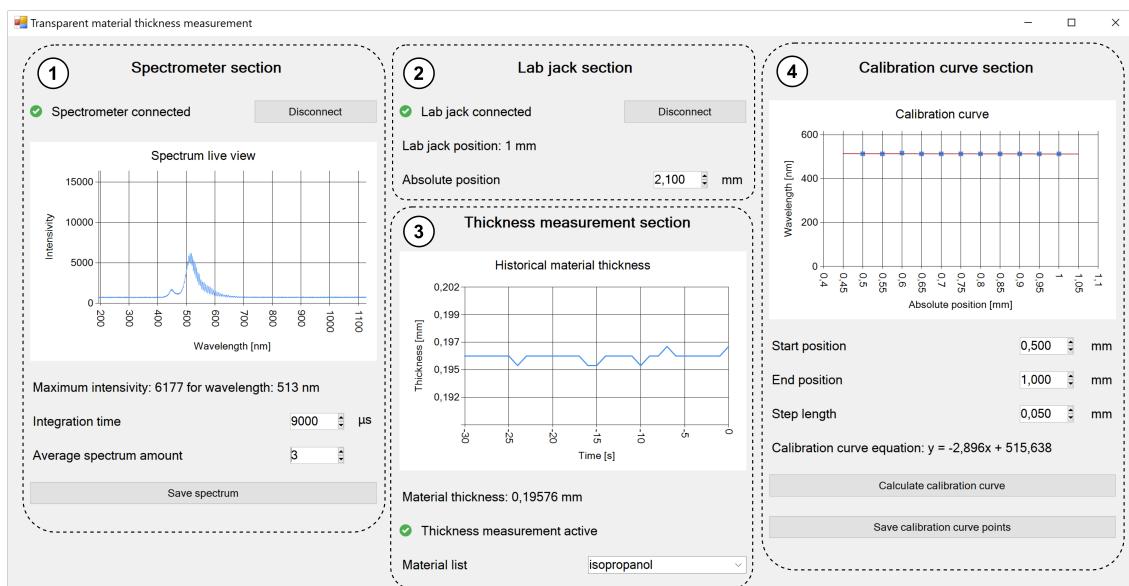
Z racji wybranego języka programowania jako środowisko uruchomieniowe wybrano środowisko dedykowane Microsoft Visual Studio 2022. Docelową platformą jest .NET Framework 4.8, gdyż biblioteki dostarczone przez producentów są zgodne z taką wersją. Postępując zgodnie z dokumentacją obydwu producentów urządzeń do projektu należało zimportować poszczególne pliki bibliotek .dll, które są dostępne do pobrania ze stron producentów osprzętu. Należało także zainstalować sterowniki, które zapewnią komunikację ze spektrometrem i platformą laboratoryjną. Komunikacja z każdym urządzeniem odbywa się przez podłączone kable USB.

3.2. STRUKTURA PROJEKTU

Tworzenie oprogramowania wykorzystując obiektowy paradygmat programowania zapewnia łatwiejsze zarządzanie fragmentami kodu, które stanowią całą aplikację. W tym celu kod został pogrupowany na klasy w zależności od obejmowanych funkcjonalności.

- **DeviceHandlers** - klasy SpectrometerHandler i LabJackHandler odpowiadające za obsługę i komunikację z urządzeniami zewnętrznymi tj. spektrometr i platforma laboratoryjna

- **Forms** - klasy odpowiadające za formę graficzną aplikacji; główną klasą jest MainForm, która obejmuje okno programu, ponadto w skład głównego okna wchodzą mniejsze sekcje zawarte w innych klasach (opisane w dalszej części pracy)
- **CalibrationCurve** - klasa zawierająca część logiczną odpowiedzialną za procedury związane z wyznaczaniem krzywej kalibracyjnej
- **CurveFitting** - klasy dotyczące procedury dopasowania krzywych wybranych modeli matematycznych do rzeczywistych sygnałów spektralnych
- **Mocks** - klasy umożliwiające symulowanie rzeczywistego urządzenia
- **Interfaces** - interfejsy na bazie których powstały klasy DeviceHandlers; w ten sposób zapewniona jest integralność aplikacji w momencie zastosowania innego urządzenia, wystarczy utworzyć nową klasę na podstawie danego interfejsu
- **Others** - pozostałe klasy odpowiedzialne np. za zapisywanie danych do pliku zewnętrznego



Rys. 3.1. Zrzut ekranu przedstawiający interfejs graficzny utworzonej aplikacji; wydzielone sekcje interfejsu zostały ponumerowane

W odniesieniu do rysunku 3.1 interfejs został podzielony na kilka sekcji, które są odpowiedzialne za różne funkcjonalności napisanego oprogramowania. Wyodrębniono następujące sekcje:

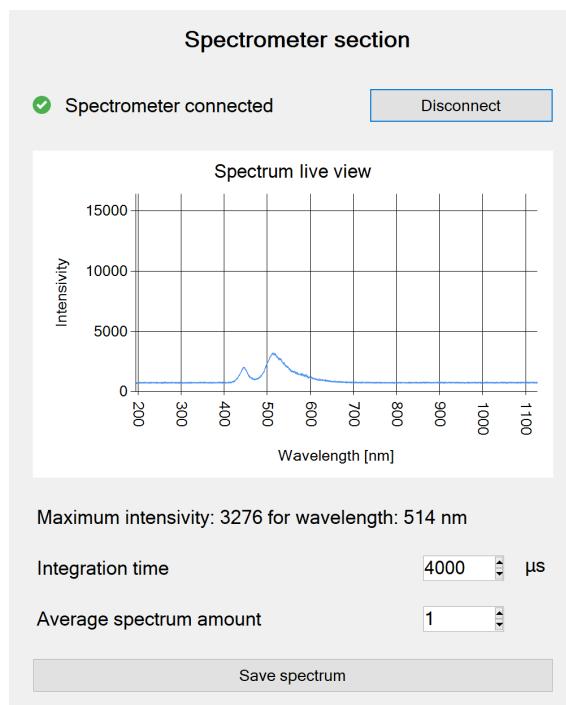
1. sekcja obsługi spektrometru
2. sekcja obsługi platformy laboratoryjnej
3. sekcja pomiaru grubości warstwy materiału transparentnego
4. sekcja wyznaczania krzywej kalibracyjnej

Każda z tych sekcji jest dokładniej opisana w kolejnych rozdziałach 3.3-3.6. W ramach wydzielonych części aplikacji działają klasy *background worker*. Jest to klasa, która w ra-

mach platformy .NET pozwala na wykonywanie operacji na osobnym wątku [62]. Niektóre założenia dotyczące funkcjonowania aplikacji wymagały zastosowania takiego podejścia. Ponadto podział operacji na klasy dziedziczące po klasie *background worker* pozwala na napisanie kodu w odrębnych elementach. Takie podejście sprawia, że zarządzanie plikami z kodem jest znacznie prostsze.

3.3. SEKCJA OBSŁUGI SPEKTROMETRU

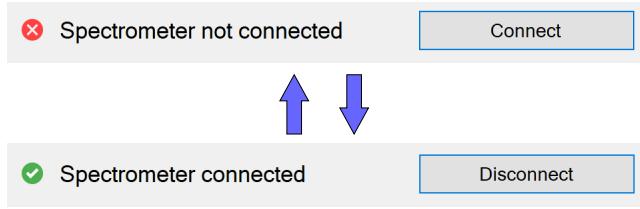
Niniejsza sekcja dotyczy komunikacji ze spektrometrem, akwizycji i przetwarzania danych spektralnych.



Rys. 3.2. Interfejs graficzny sekcji obsługi spektrometru w opracowanej aplikacji

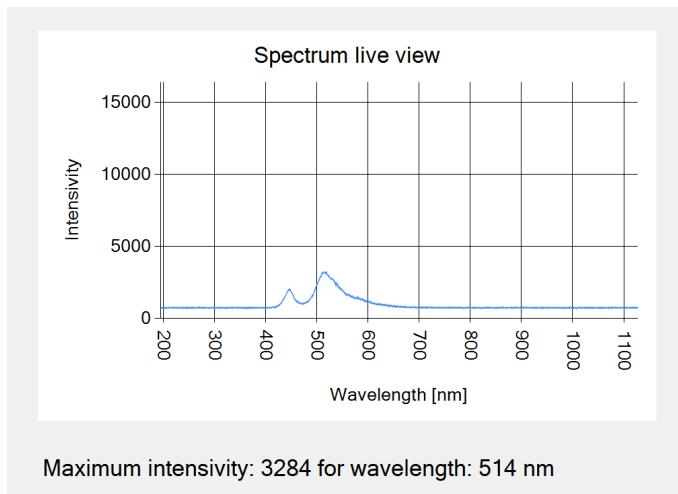
Zgodnie z przedstawionym interfejsem na rysunku 3.2 na samej górze omawianej sekcji umieszczono przycisk, po którego kliknięciu rozpoczyna się procedura nawiązania bądź zakończenia komunikacji ze spektrometrem. Zawartość etykiety tekstowej oraz tekstu przycisku jest zmieniana w zależności od bieżącego stanu tj. spektrometr podłączony lub niepodłączony (rysunek 3.3). Wszelkie operacje ze spektrometrem zostają wykonane przez wywołanie metod instancji klasy *SpectrometerHandler*.

Gdy pomyślnie zostanie nawiązana komunikacja ze spektrometrem następuje wywołanie obiektu klasy *background worker SpectrometerMeasurement*. W ramach tej klasy następuje akwizycja danych ze spektrometru i wyświetlenie ich na wykresie (rysunek 3.4). Wykres przedstawia relację między intensywnością (osi Y) i długością fal bieżącego stanu spektralnego (osi X). Ponadto zostaje wyznaczona długość fali o najwyższej intensywności,



Rys. 3.3. Dynamiczna zmiana parametrów elementów w zależności od bieżącego stanu komunikacji ze spektrometrem

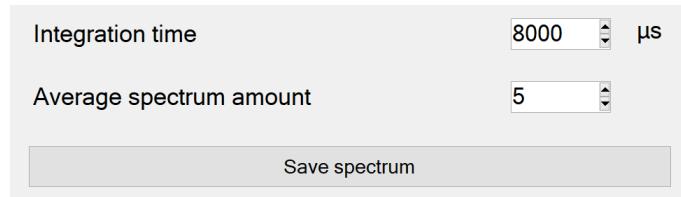
taka informacja zostaje umieszczona na ekranie. Odświeżanie bieżących wartości następuje aż nie zostanie wywołana procedura zakończenia komunikacji ze spektrometrem. Wtedy dane z wykresu zostają usunięte i nie wyświetla się maksymalna intensywność dla fali o danej długości.



Rys. 3.4. Wykres bieżących danych spektralnych wraz z wyznaczeniem długości fali o maksymalnej intensywności

W dolnej części sekcji obsługi spektrometru (rysunek 3.5) umieszczone są dwa pola tekstowe, które pozwalają użytkownikowi na modyfikację bieżących parametrów pomiaru. Pierwsze pole tekstowe pobiera czas integracji, czyli czas zbierania pojedynczego sygnału spektralnego (domyślnie wynosi $4000 \mu\text{m}$). Z kolei drugie pole tekstowe pobiera ilość pomiarów na podstawie, których tworzone jest średnie, finalne spektrum wyświetlane na wykresie (domyślnie brany pod uwagę jest tylko jeden pomiar). Użytkownik może zmieniać wartości przez klikanie strzałek umieszczonych przy polach tekstowych lub wprowadzając wartość z klawiatury. Każda zmiana wartości od razu wywołuje przypisanie nowych wartości do parametrów.

Na samym dole umieszczony jest przycisk, który pozwala na zapisanie bieżącego wykresu spektrum do pliku CSV, aby poddać dane indywidualnemu przetwarzaniu. Użytkownik może zdefiniować sciezkę zapisu oraz nazwę pliku.

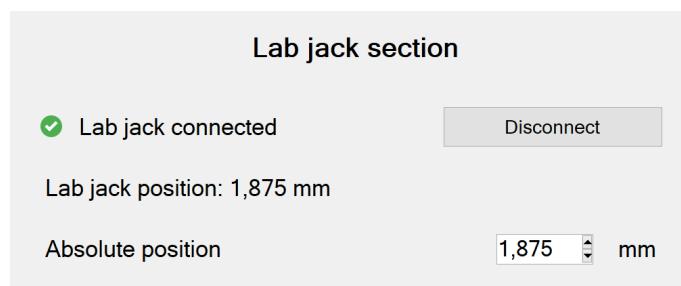


Rys. 3.5. Elementy umożliwiające modyfikację parametrów pomiaru przez użytkownika oraz zapis bieżącego spektrum do pliku CSV

Pola tekstowe i przyciski mogą przyjmować stany aktywne lub nieaktywne. Jest to zależne od statusu komunikacji ze spektrometrem.

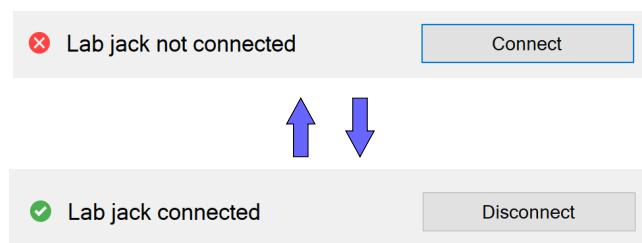
3.4. SEKCJA OBSŁUGI PLATFORMY LABORATORYJNEJ

Opisywana sekcja odpowiada za komunikację z platformą pomiarową oraz kontrolowanie jej pozycji.



Rys. 3.6. Interfejs graficzny sekcji obsługi platformy laboratoryjnej w opracowywanej aplikacji

Interfejs przedstawiony na rysunku 3.6 zawiera przycisk, po którego kliknięciu jest wywoływana procedura nawiązania lub zerwania komunikacji z platformą laboratoryjną, zależnie od jej bieżącego stanu. Zawartość etykiety tekstowej i tekstu przycisku jest dynamiczna, adekwatnie do obecnego statusu komunikacji (rysunek 3.7). Operacje związane z komunikacją platformy laboratoryjnej zostają wykonane przez wywołanie instancji klasy background worker *LabJackConnection*, która z kolei odwołuje się do instancji *LabJackHandler*.



Rys. 3.7. Dynamiczna zmiana parametrów elementów w zależności od bieżącego stanu komunikacji z platformą laboratoryjną

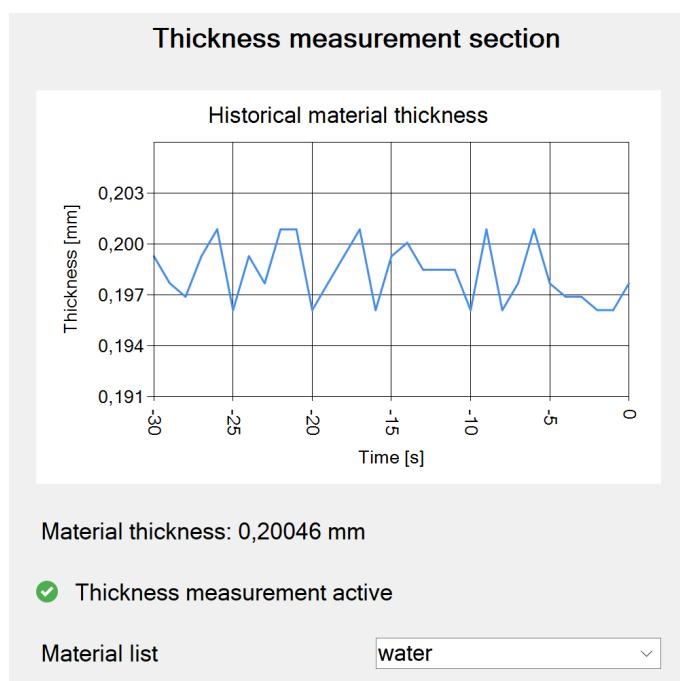
Po pomyślnym nawiązaniu komunikacji z platformą laboratoryjną następuje wywołanie metod klas background worker *LabJackMove* i *LabJackPosition*, które działają niezależnie od siebie.

Obiekt klasy *LabJackMove* na oddzielnym wątku odpowiada za kontrolę pozycji platformy. Gdy tylko użytkownik zmieni wartość w polu tekstowym używając strzałek lub wprowadzi pozycję z klawiatury to następuje przemieszczenie platformy na zadaną pozycję. Pole tekstowe dzięki wbudowanym właściwościom nie pozwala użytkownikowi przekroczyć zakresu przemieszczenia stolika lub wprowadzić ciąg znaków, który nie jest liczbą.

Kolejna obiekt klasy *LabJackPosition* realizuje aktualizację bieżącej pozycji platformy laboratoryjnej dokonując zapytań do instancji *LabJackHandler*.

3.5. SEKCJA POMIARU GRUBOŚCI WARSTWY MATERIAŁU

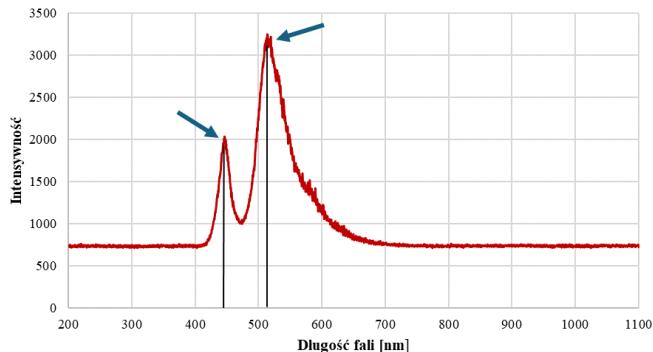
W ramach niniejszej sekcji realizowane są procedury pomiaru grubości warstwy badanego materiału.



Rys. 3.8. Interfejs graficzny sekcji pomiaru grubości materiału w opracowywanej aplikacji

Szczegółowy sposób pomiaru grubości materiału z matematycznego punktu widzenia został opisany w rozdziale 4.5. Na potrzeby dokonania obliczeń należy dokonać wyznaczenia długości fal dla dwóch charakterystycznych pików w spektrum. Przykładowe piki zostały oznaczone na rysunku 3.9. Lokalny wzrost intensywności jest spowodowany odbiciem fal od górnej i dolnej powierzchni badanego materiału.

Procedura pomiaru grubości warstwy materiału transparentnego jest inicjalizowana w ramach instancji klasy background worker *ThicknessMeasurement* po spełnieniu trzech



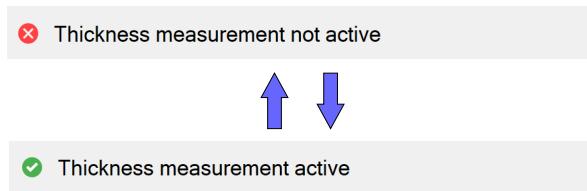
Rys. 3.9. Wykres danych spektralnych z oznaczonymi pikami powstałymi w wyniku odbicia fal

warunków: nawiązana komunikacja ze spektrometrem, nawiązana komunikacja z platformą laboratoryjną oraz wartość intensywności dla obydwu odbitych długości fal jest większa niż 1200.

Po zainicjalizowaniu następuje odczyt długości fal dla pików spektralnych na podstawie danych odczytyanych przez spektrometr. Szczegóły dotyczące implementacji algorytmu odczytującego długości fal zostały przedstawione w rozdziałach 4.6 oraz 4.7. Jeśli intensywność obydwu pików jest większa od 1200 to procedura przechodzi do dalszych kroków. Zgodnie z ustalonimi zależnościami matematycznymi po podstawieniu długości fal punktów charakterystycznych następuje obliczenie grubości warstwy.

W górnej części sekcji został umieszczony wykres historyczny obliczonej grubości materiału. Na osi X wyświetlane są wyniki grubości materiału z ostatnich 30 sekund. Poniżej wykresu wyświetlana jest dokładna wartość grubości w danym momencie z dokładnością do 5 miejsc po przecinku.

W dalszej kolejności znajduje się etykieta statusu pomiaru grubości. Jeśli choć jeden z wyżej opisanych warunków nie został spełniony widnieje informacja o nieaktywnym pomiarze. Gdy warunki są spełnione pomiar jest aktywny, a stosowna informacja jest wyświetlana (rysunek 3.10).



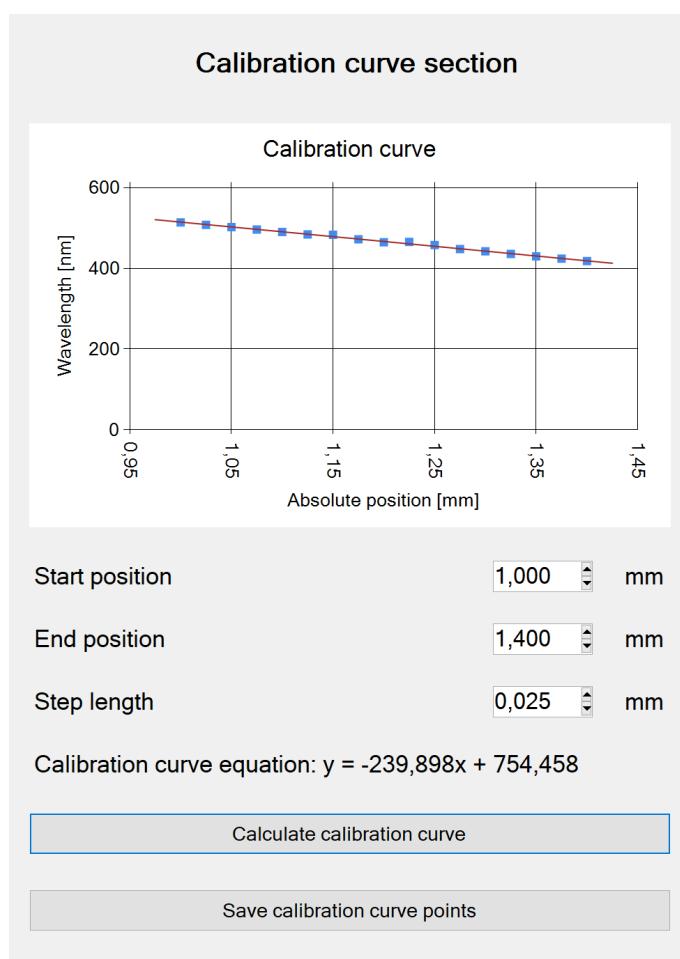
Rys. 3.10. Dynamiczna zmiana zawartości elementu w zależności obecnego statusu pomiaru grubości materiału

Na dole sekcji pomiaru grubości materiału została umieszczona rozwijana lista, która umożliwia wybranie materiału, który zostaje poddany pomiarowi. Wybór konkretnej pozycji

wiąże się ze zmianą wartości współczynnika załamania światła, który jest powiązany z zależnością wykorzystaną do określenia grubości warstwy.

3.6. SEKCJA WYZNACZANIA KRZYWEJ KALIBRACYJNEJ

W ramach tej sekcji możliwe jest wyznaczenie krzywej kalibracyjnej czujnika. Określenie parametrów krzywej kalibracyjnej pozwala zbadać czy elementy optyczne czujnika są odpowiednio skalibrowane i odnieść to do wyznaczonych wartości teoretycznych. Na podstawie takiej krzywej można określić odległość od powierzchni jakiegoś obiektu. Szczegółowo proces wyznaczania parametrów krzywej kalibracyjnej został zawarty w podrozdziale 4.3 niniejszej pracy.



Rys. 3.11. Interfejs graficzny sekcji wyznaczania krzywej kalibracyjnej w opracowywanej aplikacji

W górnej części sekcji umieszczony został wykres na którym odznaczane są sukcesywnie kolejne punkty podczas trwania procedury wyznaczania parametrów krzywej. Gdy platforma laboratoryjna osiągnie docelową pozycję zostaje wyznaczone równanie krzywej kalibracyjnej. Przebieg wyliczonej krzywej zostaje również odzwierciedlony na wykresie. Końcowa forma równania krzywej jest przedstawiona pod polami tekstowymi.

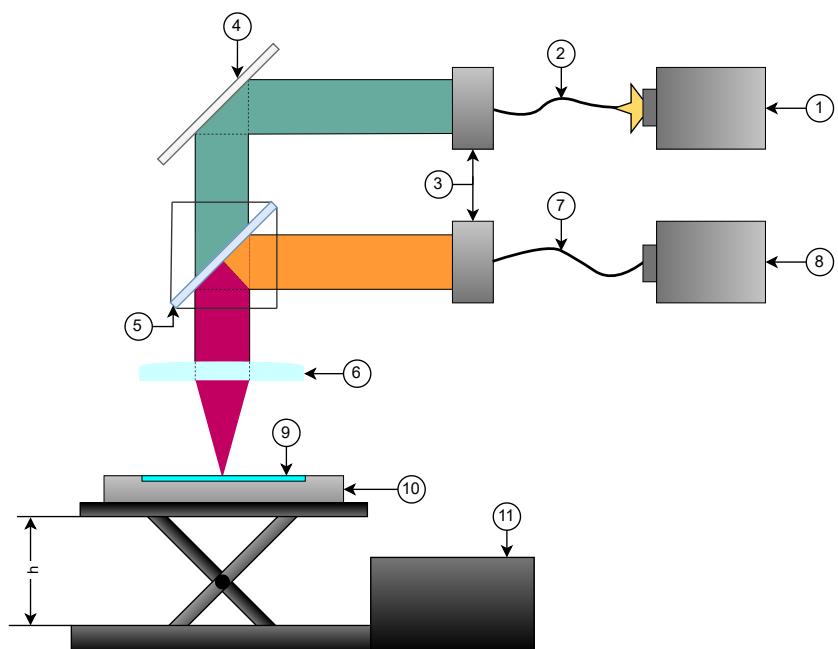
Samo rozpoczęcie procedury wyznaczania krzywej kalibracyjnej jest możliwe, gdy nawiązano komunikację ze spektrometrem oraz z platformą laboratoryjną. Wtedy aktywne są pola tekstowe i przycisk rozpoczynający ruch stolika. W celu poprawnego rozpoczęcia procedury należy określić punkt startowy i punkt końcowy, a także wartość kroku z jakim ma się przemieszczać platforma w danym przedziale. Użytkownik może zmieniać wartości przy użyciu strzałek lub wprowadzać je z klawiatury. Gdy wartości są poprawnie wprowadzone, po kliknięciu przycisku następuje przemieszczenie platformy laboratoryjnej do pozycji startowej, a następnie przesuwa się do pozycji docelowej zgodnie z określonym krokiem.

Jak tylko parametry krzywej kalibracyjnej zostają wyznaczone to możliwy jest zapis zebranych punktów do pliku CSV w celu indywidualnego ich przetwarzania. Zapis odbywa się przez kliknięcie przycisku umieszczonego na samym dole sekcji. Wtedy wyświetlane jest okno w którym definiowana jest ścieżka zapisu oraz nazwa pliku.

4. BADANIA

4.1. BUDOWA SYSTEMU OPTYCZNEGO

Poglądowy schemat, który zawiera elementy systemu optycznego użytego do badań grubości warstwy wody został zawarty na rysunku 4.1. Wartość h jest zmienna, w zależności od zadanej pozycji platformie laboratoryjnej.



Rys. 4.1. Schemat przedstawiający elementy układu optycznego, który został wykorzystany do badania grubości warstwy wody

System optyczny składa się z następujących elementów:

1. źródło światła - **Thorlabs MINTF4**
2. światłowód optyczny wejściowy
3. kolimatory światłowodowe
4. zwierciadło
5. dzielnik wiązki
6. soczewka skupiająca (płasko-wypukła) - **Thorlabs AL1225-A**
7. światłowód optyczny wyjściowy

8. spektrometr - **Ocean Optics HR4000**
9. badana warstwa wody
10. naczynie wykorzystane do wyznaczenia konkretnej grubości warstwy wody
11. ruchoma platforma laboratoryjna - **Thorlabs L490MZ/M**

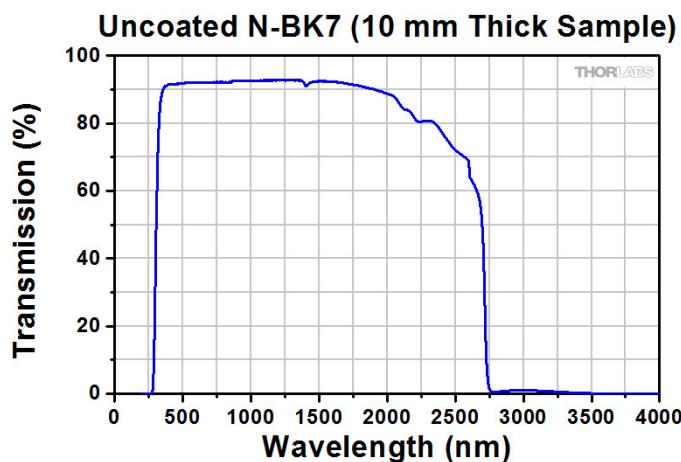
Elementem, który odpowiada za doprowadzenie światła do układu optycznego jest dioda LED - Thorlabs MINTF4. Nominalna długość fali tego źródła światelnego wynosi 554 nm, czyli emisja fale w zakresie widzialnym. Element ten posiada wyprowadzenie światłowodowe, które zostało wykorzystane w celu dalszej transmisji promieni na układ optyczny [63].



Rys. 4.2. Źródło światła wykorzystane w układzie - Thorlabs MINTF4

[63]

Wykorzystana soczewka skupiająca Thorlabs AL1225-A jest wykonana z materiału N-BK7. Szkło N-BK7 charakteryzuje się wysoką przepuszczalnością światła w zakresie spektralnym, który jest wykorzystany do badań (rysunek 4.3).



Rys. 4.3. Charakterystyka przedstawiająca transmisję światła względem długości fal dla materiału N-BK7 [64]

Średnica wykorzystanej soczewki wynosi 12,5 mm. Dla promieni o długości 780 nm ognisko takiej soczewki równa się 25 mm. Dopuszczalne odchylenie wartości ogniskowej jest równe 1% [65].

Urządzeniem, które przechwytuje odbite światło jest spektrometr Ocean Optics HR4000. Przedstawiony spektrometr cechuje się rozdzielczością matrycy równą 3648 pikseli i zakresem pomiarowym od 200 do 1100 nm. W rezultacie dla takiego zakresu i rozdzielczości można dokonywać odczytu spektrum z dokładnością do 0,27 nm. Spektrometr ten pozwala na zadanie czasu integracji (przechwytywania światła) w przedziale 3,8 ms - 10 s. Komunikacja z komputerem oraz zasilanie spektrometru odbywa się przez port USB typu B [66].



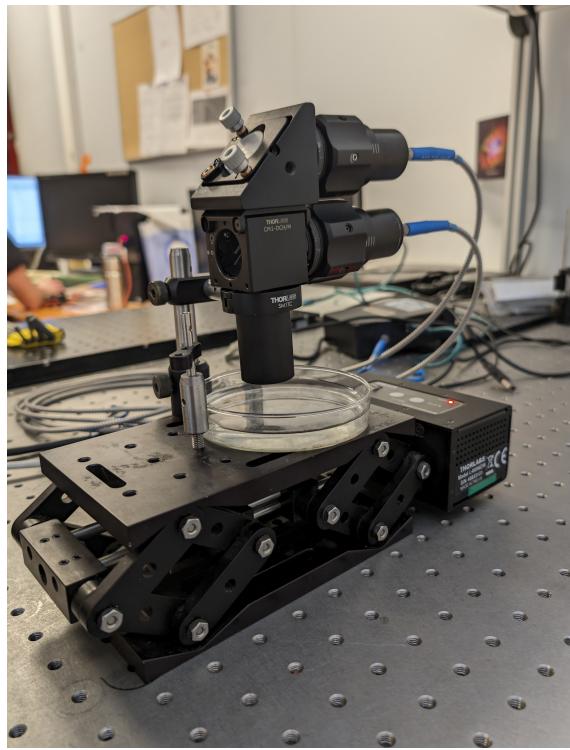
Rys. 4.4. Detektor układu optycznego - spektrometr OceanOptics HR4000 [66]

Aktuatorem odpowiedzialnym za przemieszczanie naczynia z wodą jest platforma laboratoryjna Thorlabs L490MZ/M. Zakres ruchu wertykalnego platformy wynosi 0-50 mm, a dokładność pozycjonowania wynosi $30 \mu\text{m}$. Komunikacja napędu platformy, podobnie jak w przypadku spektrometru, odbywa się przez USB. Ruch pionowy platformy pozwala na przemieszczenie badanego obiektu w zakresie pomiarowym czujnika [67].



Rys. 4.5. Platforma laboratoryjna Thorlabs L490MZ/M wykorzystana do badań grubości warstwy wody [67]

Faktyczny stan systemu optycznego został przedstawiony na rysunku 4.6. Na platformie laboratoryjnej jest umieszczone inne naczynie niż to, które zostało finalnie wykorzystane do badań.



Rys. 4.6. Rzeczywisty układ optyczny przy użyciu którego dokonywano badań

4.2. USTALENIE ZAKRESU POMIAROWEGO CZUJNIKA

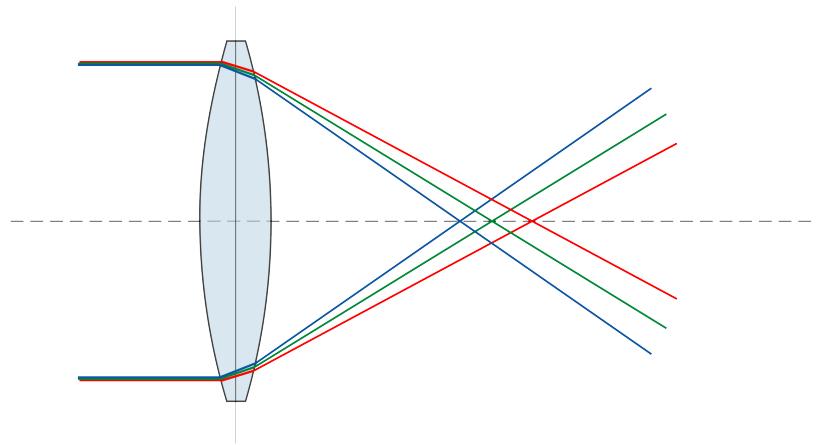
Tworzony czujnik chromatyczny wykorzystuje zjawisko aberracji chromatycznej podłużnej do dokonania pomiarów. Zjawisko aberracji chromatycznej zostało przedstawione na rysunku 4.7, a szczegóły zostały przybliżone w rozdziale 2.6.1, gdy omówiono ogólną budowę i zasadę działania konfokalnych czujników chromatycznych. Fale o krótszej długości ogniskują się bliżej soczewki, a dłuższe fale są ogniskowane w większej odległości.

W skład układu optycznego wchodzi źródło światła (dokładny opis układu w rozdziale 4.1), które charakteryzuje się spektrum o wysokiej intensywności w zakresie 500-650 nm. Z powodu następującej charakterystyki źródła światła (rysunek 4.8) zdecydowano się na ustalenie zakresu pomiarowego w przedziałach 500-650 nm.

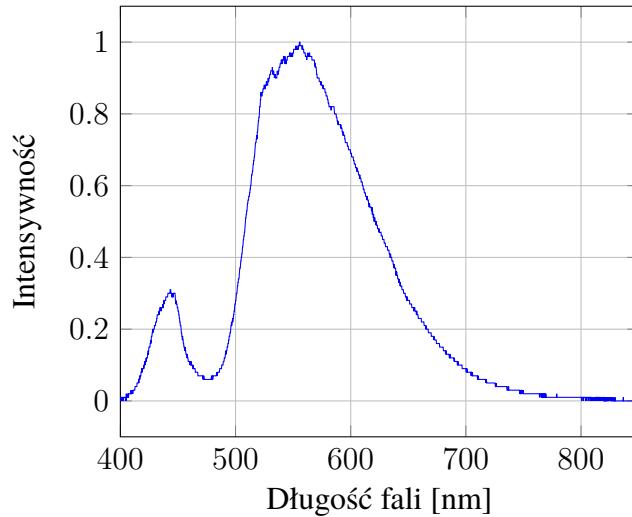
Wyznaczono także odległość pracy (*ang. working distance*) w jakiej należy umieścić soczewkę skupiającą od badanego elementu. Wartość ta została obliczona dla fali o długości 575 nm, ponieważ jest w połowie badanego zakresu 500-650 nm (rysunek 4.9). Odległość pracy jest równa dystansowi na którym zogniskują się fale o danej długości, gdyż używana soczewka jest soczewką skupiającą.

Zgodnie z przedstawionymi elementami układu optycznego (rozdział 4.1) wybrana została soczewka skupiająca **Thorlabs AL1225-A** o średnicy 12,5 mm. Każda z potrzebnych odległości oblicza się na podstawie danych dostępnych na stronie producenta. Producent Thorlabs dla każdej soczewki podaje parametry ogniskowej dla fali o wybranej długości.

W przypadku soczewki Thorlabs AL1225-A wartość ogniskowej wzorcowej wynosi

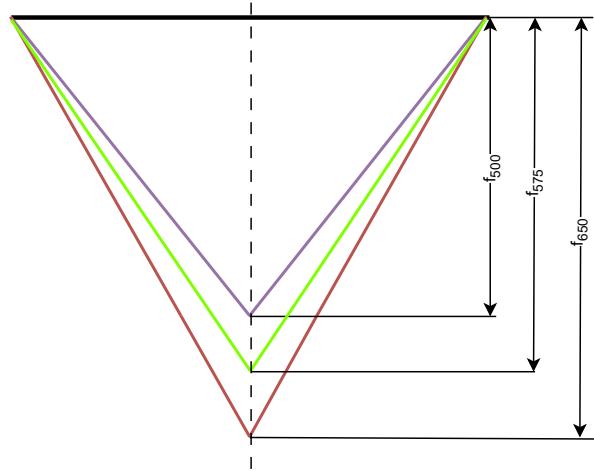


Rys. 4.7. Aberracja chromatyczna podłużna występująca wskutek transmisji światła przez soczewkę skupiającą [44]



Rys. 4.8. Wykres przedstawiający spektrum diody LED Thorlabs MINTF4 zastosowanej w układzie optycznym jako źródło światła [63]

25 mm dla fali o długości 780 nm [65]. Na podstawie tych parametrów można wyznaczyć ogniskowe dla fal o innych długościach, gdyż producent zapewnia arkusze zawierające wartości przesunięcia ogniskowej dla innych długości fali (tabela 4.1). W ten sposób zostaną obliczone wartości parametrów f_{500} , f_{575} i f_{650} (rysunek 4.9).



Rys. 4.9. Schemat przedstawiający wyznaczany zakres pomiarowy czujnika oraz odległość od soczewki w jakiej następuje zogniskowanie fal

Tabela 4.1. Tabela przedstawiająca przesunięcia ognisk dla fal o badanych długościach [65]

Długość fali	Przesunięcie
500 nm	-0,4905 mm
575 nm	-0,2977 mm
650 nm	-0,1621 mm

$$f_{500} = f + f_{shift500} = 25 \text{ mm} + (-0,4905 \text{ mm}) = 24,5095 \text{ mm} \quad (4.1)$$

gdzie:

f_{500} – ogniskowa dla fal o długości 500 nm

f – ogniskowa wzorcowa

$f_{shift500}$ – wartość przesunięcia dla fal o długości 500 nm (zgodnie z tabelą 4.1)

$$f_{575} = f + f_{shift575} = 25 \text{ mm} + (-0,2977 \text{ mm}) = 24,7023 \text{ mm} \quad (4.2)$$

gdzie:

f_{575} – ogniskowa dla fal o długości 575 nm

f – ogniskowa wzorcowa

$f_{shift575}$ – wartość przesunięcia dla fal o długości 575 nm (zgodnie z tabelą 4.1)

$$f_{650} = f + f_{shift650} = 25 \text{ mm} + (-0,1621 \text{ mm}) = 24,8379 \text{ mm} \quad (4.3)$$

gdzie:

f_{650} – ogniskowa dla fal o długości 650 nm

f – ogniskowa wzorcowa

$f_{shift650}$ – wartość przesunięcia dla fal o długości 650 nm (zgodnie z tabelą 4.1)

$$z_{air} = f_{650} - f_{500} = 24,8379 \text{ mm} - 24,5095 \text{ mm} = 0,3284 \text{ mm} \quad (4.4)$$

gdzie:

z_{air} – zakres pomiarowy czujnika w powietrzu

f_{650} – wartość ogniskowej dla fal o długości 650 nm (zgodnie z równaniem 4.3)

f_{500} – wartość ogniskowej dla fal o długości 500 nm (zgodnie z równaniem 4.1)

Na podstawie teoretycznych założeń i równania 4.2 badanie powłoki należy dokonywać w odległości **24,7023 mm** od powierzchni soczewki. Zakres pomiarowy czujnika w powietrzu, zgodnie z równaniem 4.4, wynosi **0,3284 mm**.

Zagadnienie pomiaru grubości warstwy wody wiąże się jednak z bardziej złożoną analizą. Dzieje się tak, ponieważ dochodzi do załamania fal świetlnych, które są emitowane na warstwę wody w celu pomiaru jej grubości. Z tego powodu zakres pomiarowy dla materiału przeźroczystego ma inną wartość (rysunek 4.10).

Dane wymagane do wyznaczenia wartości z_{water} zostały umieszczone w tabeli 4.2. Wartości współczynników załamania zostały dobrane zgodnie z długościami fal, które znajdują się w danych ośrodkach [68].

Tabela 4.2. Tabela zawierająca dane do wyznaczenia zakresu pomiarowego czujnika w wodzie
[65, 68]

\varnothing lens	12,5 mm
n_1	1,0003
n_2	1,331
f_{500}	24,5095 mm
f_{650}	24,8379 mm

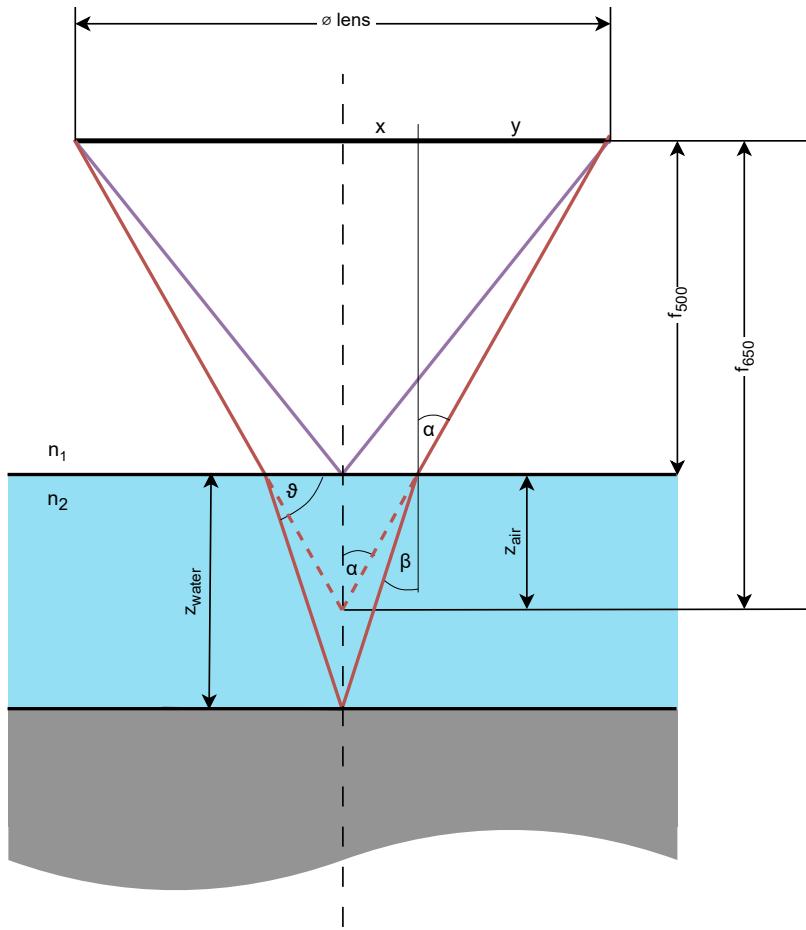
Na podstawie rysunku 4.10 zostały wyznaczone równania 4.5 - 4.14.

$$x = 0,5 \cdot \varnothing \text{ lens} - y = 6,25 - y \quad (4.5)$$

gdzie:

\varnothing lens – średnica soczewki

x, y – zmienne robocze



Rys. 4.10. Szczegółowy schemat przedstawiający metodę wyznaczania zakresu pomiarowego implementowanego czujnika dla warstwy wody; $\varnothing \text{ lens}$ - średnica soczewki, n_1 - współczynnik załamania światła dla powietrza, n_2 - współczynnik załamania światła dla wody, z_{air} - zakres pomiarowy dla powietrza, z_{water} - zakres pomiarowy dla wody, f_{500} - wartość ogniskowej dla fal o długości 500 nm, f_{650} - wartość ogniskowej dla fal o długości 650 nm

$$\frac{0,5 \cdot \varnothing \text{ lens}}{f_{650}} = \frac{y}{f_{500}} \Rightarrow y = \frac{0,5 \cdot \varnothing \text{ lens} \cdot f_{500}}{f_{650}} \quad (4.6)$$

Z zależności 4.6 wynika:

$$y = \frac{0,5 \cdot 12,5 \cdot 24,5095}{24,8379} = 6,167364 \text{ mm} \quad (4.7)$$

Na podstawie równań 4.5 i 4.7:

$$x = 6,25 - 6,167364 = 0,0826358 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Wyznaczenie wartości x pozwoli na obliczenia kąta α 4.10:

$$\tan \alpha = \frac{x}{z_{air}} = \frac{0,0826358}{0,3284} = 0,25163154 \Rightarrow \alpha = 14,12^\circ \quad (4.9)$$

Z prawa Snelliusa (rozdział 1.1) zostaną obliczone wartości kątów β i θ (rysunek 4.10):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \sin \beta = \frac{1,0003 \cdot \sin 14,12^\circ}{1,331} = \frac{1,0003 \cdot 0,243954}{1,331} = 0,183835 \quad (4.10)$$

gdzie:

α, β – kąty związane z padaniem promieni świetlnych

n_1 – współczynnik załamania światła dla powietrza

n_2 – współczynnik załamania światła dla wody

$$\sin \beta = 0,183835 \Rightarrow \beta = 10,59^\circ \quad (4.11)$$

Zgodnie z zależnością 4.11 wyznacza się równanie:

$$\theta = 90^\circ - \beta = 90^\circ - 10,59^\circ = 79,41^\circ \quad (4.12)$$

gdzie:

θ – kąt związany z padaniem promieni świetlnych

Wartość z_{water} (4.14) zostaje wyznaczona na podstawie równań 4.5 i 4.12:

$$\tan \theta = \frac{z_{water}}{x} \quad (4.13)$$

$$z_{water} = \tan \theta \cdot x = \tan 79,41^\circ \cdot 0,0826358 = 5,34862 \cdot 0,0826358 = 0,430793 \text{ mm} \quad (4.14)$$

Jako rezultat końcowy powyższych zależności został wyznaczony teoretyczny zakres pomiarowy dla wody równy **0,430793 mm**.

4.3. WYZNACZENIE KRZYWEJ KALIBRACYJNEJ

Głównym założeniem opracowywanego czujnika chromatycznego jest jego zdolność do ustalania grubości materiałów transparentnych. Jednakże, korzystając z właściwości zjawiska aberracji chromatycznej można również wykorzystać taki układ optyczny do określania odległości od obiektu. W tym celu należy wyznaczyć krzywą kalibracyjną

sensora. Krzywa kalibracyjna opisuje zależność długości fal o najwyższej intensywności i odległości od obiektu (równanie 4.15). Znając równanie krzywej można wyznaczyć dowolną odległość od obiektu tylko na podstawie wartości fali o najwyższej intensywności, która jest odczytywana przez spektrometr. Samo równanie krzywej kalibracyjnej nie ma wpływu na proces wyznaczenia grubości materiału, jednak zestawienie wyników z założeniami teoretycznymi ma na celu poprawne skalibrowanie układu optycznego, a to z kolei rzutuje na dalsze kroki związane z procedurą wyznaczenia grubości.

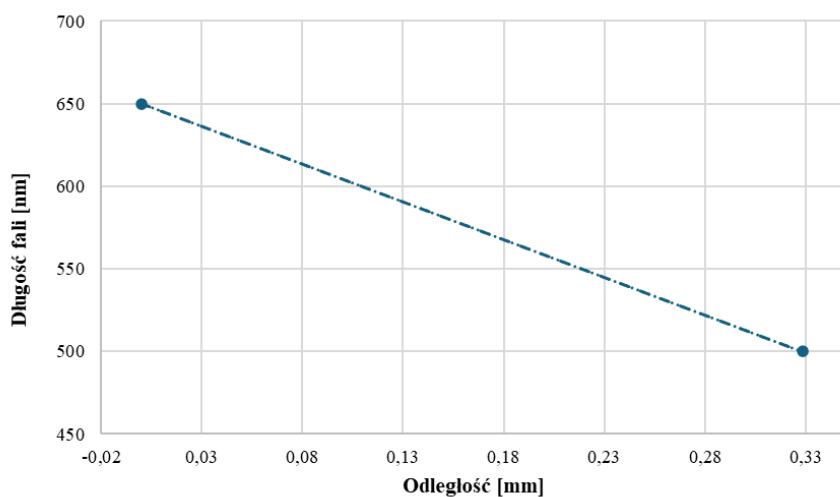
$$\lambda = f(d) \quad (4.15)$$

gdzie:

λ – długości fali, która była najbardziej intensywna w danym położeniu obiektu
 d – odległość od obiektu

Znając wartość fal i wartość zakresu teoretycznego, na ich podstawie można określić teoretyczną krzywą kalibracyjną. W zakresie widzialnym krzywa kalibracyjna powinna mieć przebieg zbliżony do prostej nachylonej pod kątem do osi X układu współrzędnych.

Teoretyczny zakres pomiarowy został wyznaczony dla fal o długościach 500 nm oraz 650 nm. Sama wartość zakresu teoretycznego jest równa 0,3284 mm (dla powietrza). Znajomość tych parametrów pozwala na wyznaczenie współczynników równania liniowego krzywej kalibracyjnej.

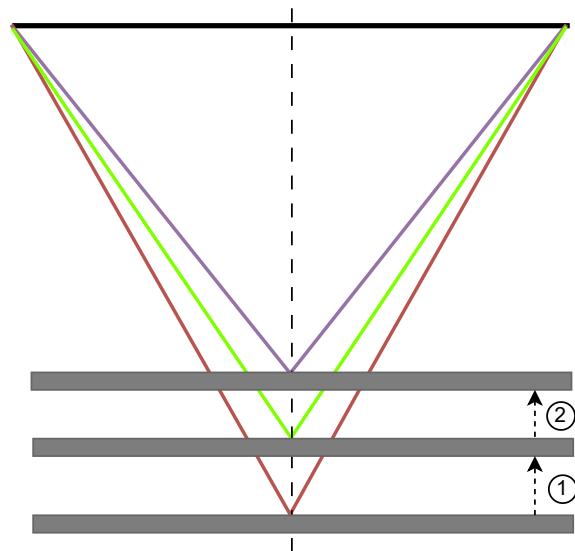


Rys. 4.11. Wykres przedstawiający wyznaczoną teoretyczną krzywą kalibracyjną

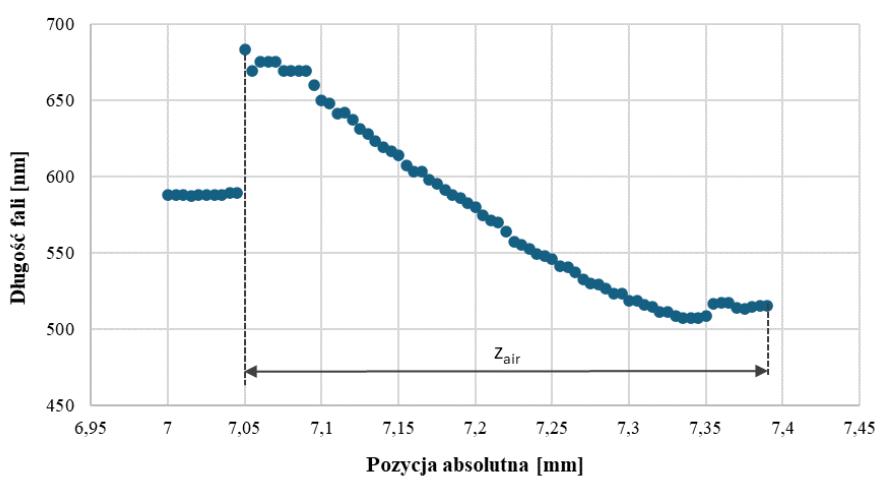
Równanie liniowe teoretycznej krzywej kalibracyjnej: $y = -456,76x + 650$.

Posiadając wyliczone współczynniki a oraz b równania teoretycznej krzywej należy zweryfikować jakie współczynniki zostaną wyznaczone na podstawie danych rzeczywistych. Ewentualne różnice między współczynnikami teoretycznymi i praktycznymi mogą wskazywać na brak ortogonalności osi optycznej i podłożą od którego fale są odbijane. Różnica

wartości współczynników może być również skutkiem wyznaczenia teoretycznej krzywej tylko na podstawie soczewki skupiającej, bez uwzględnienia pozostałych elementów układu optycznego. Innym aspektem jest również możliwe zewnętrzne zakłócenie pomiarów w postaci światła otoczenia, które nie zostało uwzględnione.

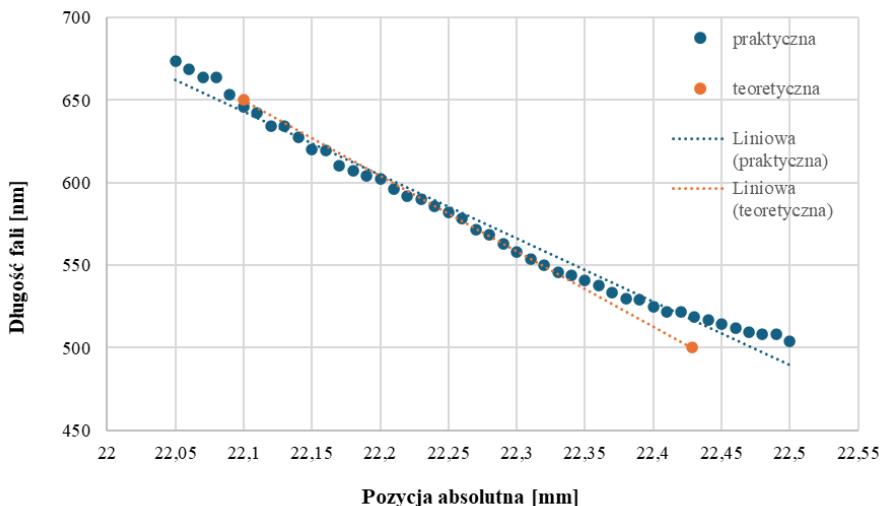


Rys. 4.12. Przedstawienie procedury przemieszczania powierzchni w celu weryfikacji poprawności wyznaczenia zakresu pomiarowego czujnika



Rys. 4.13. Wykres przedstawiający zebrane pomiarowe służące do weryfikacji zakresu pomiarowego czujnika

Kluczowe jest porównanie współczynnika a , ponieważ jego wartość bezpośrednio rzutuje na nachylenie krzywej kalibracyjnej. Z kolei współczynnik b może przyjmować



Rys. 4.14. Wykres przedstawiające dane na podstawie których została wyznaczona praktyczna i teoretyczna krzywa kalibracyjna

różną wartość w zależności od tego czy odległość od mierzonego obiektu jest określona w absolutnym lub względnym układzie współrzędnych.

W początkowej fazie badań dotyczących rzeczywistych krzywych kalibracyjnych zweryfikowano wyznaczony teoretyczny zakres pomiarowy. Sprawdzono w jakim zakresie będzie uzyskiwane odbicie zogniskowanych fal świetlnych od przemieszczanej powierzchni, poglądowe przedstawienie procedury przemieszczania na rysunku 4.12.

Po przeprowadzeniu procedury przemieszczania powierzchni uzyskano dane widoczne na rysunku 4.13. Z odczytu pomiarów można wywnioskować, że praktyczny zakres pomiarowy jest równy **0,34 mm**, co przekłada się na 3,53 % błędu względem wartości teoretycznej.

W dalszej kolejności zostały przeprowadzone badania porównawcze między teoretycznym i praktycznym równaniem krzywej kalibracyjnej.

Równanie praktycznej krzywej kalibracyjnej (rys. 4.14): $y = -383,55x + 9119,2$

Równanie teoretycznej krzywej kalibracyjnej (rys. 4.14): $y = -456,76x + 10744$

Różnica współczynnika b w równaniu teoretycznym wynika z uwzględnienia pomiarów w innym układzie odniesienia, wartość współczynnika a jest niezmienna. Równanie praktycznej krzywej kalibracyjnej zostało wyznaczone przy użyciu regresji liniowej na podstawie zebranych pomiarów.

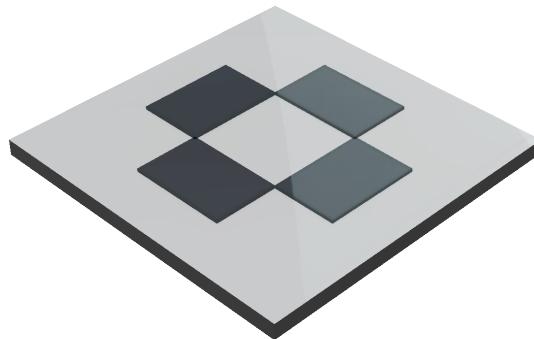
Pierwotnie różnica między współczynnikami a była większa, dlatego przeprowadzono procedurę doprecyzowania ortogonalności osi optycznej do podłoża. Procedura została wykonana manualnie i nie gwarantuje w pełni poprawnej prostopadłości, ocenie podlegała tylko wartość współczynnika. Istniejąca różnica między współczynnikami może również wynikać ze wspomnianego wpływu innych elementów optycznych, które nie zostały uwzględnione w wyznaczeniu teoretycznej krzywej. Ponadto warunki otoczenia

mogą również oddziaływać na wyniki pomiarów na podstawie, których dokonano analizy teoretycznej.

4.4. STWORZENIE NACZYNIA DO POMIARU WARSTWY CIECZY O WYZNACZONEJ GRUBOŚCI

Wyzwaniem w kwestii pomiaru grubości warstwy cieczy okazało się samo uzyskanie takiej warstwy o ustalonych wymiarach. Głębokość takiego naczynia musiała mieścić się w zakresie pomiarowym dla wody, ponieważ założeniem był pomiar grubości warstwy wody.

Początkowo pomysłem na rozwiązanie tego problemu było wykorzystanie technologii wytwarzania jakim jest druk 3D. Przeszkodami do skorzystania z tej opcji były jednak problemy dotyczące szczelności takiego naczynia oraz dokładności wykonania. W związku z tym postanowiono utworzyć takie naczynie z kawałka szkła i szkiełek nakrywkowych o grubości 0,2 mm. Taka grubość szkiełka pozwala na uzyskanie głębokości mieszczącej się w wymaganym zakresie pomiarowym. Koncepcyjny model naczynia został przedstawiony na rysunku 4.15.

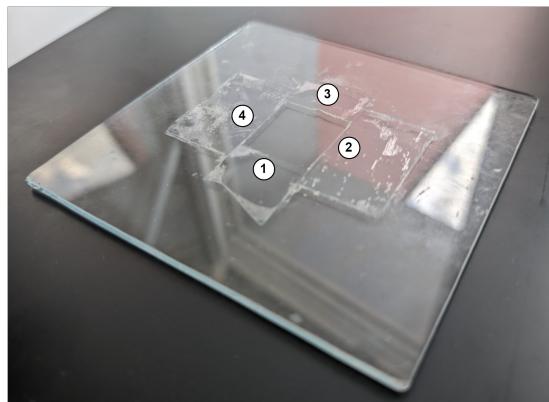


Rys. 4.15. Koncepcyjny model naczynia służącego do uzyskania warstwy wody o konkretnej grubości

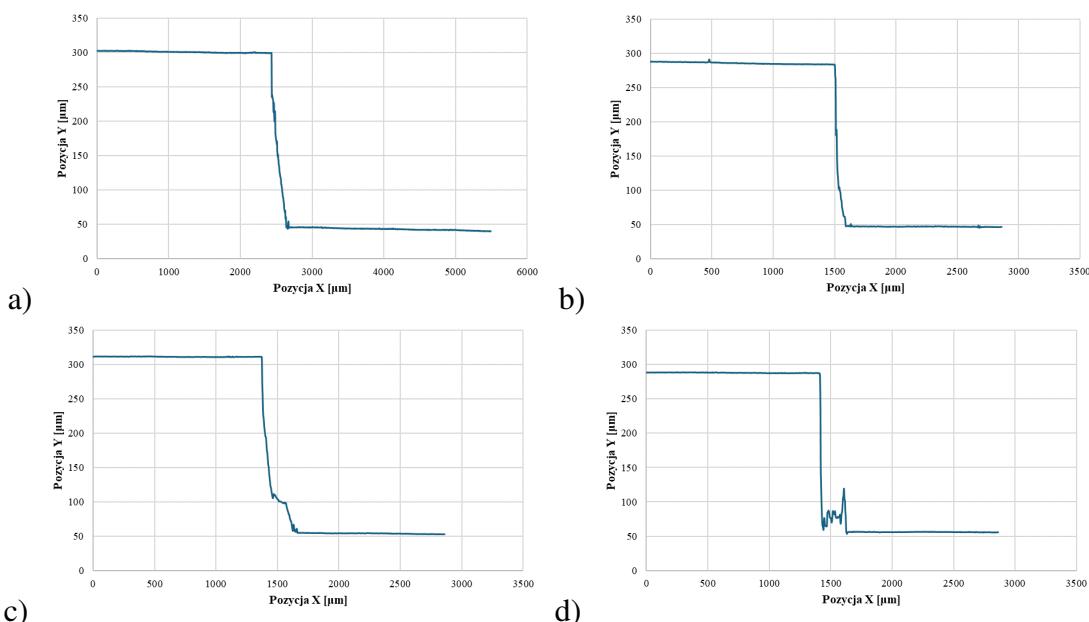
Do kawałka wyciętej szyby zostały przyklejone cztery szkiełka nakrywkowe klejem epoksydowym (rys. 4.16).

Istniało duże prawdopodobieństwo, że warstwa kleju w przypadku każdego szkiełka nakrywkowego będzie miała różną grubość. Dlatego wykorzystano mikroskop konfokalny o rozdzielczości pomiaru wysokości do 10 nm do pomiaru głębokości utworzonego naczynia. Zebrano pomiary dla każdej ściany i ustalono głębokość naczynia. Warto jednak uwzględnić, że została zmierzona wysokość każdej ściany tylko w jej jednym punkcie. Aby uzyskać bardziej precyzyjne wartości należałoby zwiększyć ilość punktów pomiarowych na każdej ścianie oraz przynajmniej uśrednić wyniki.

W tabeli 4.3 zostały zawarte wartości głębokości. Największy wpływ na różnice wartości ma nierówna wysokość warstwy kleju oraz powtarzalność grubości szkła na całej



Rys. 4.16. Utworzone naczynie do wytworzenia warstwy wody o zadanej grubości; ścianki zgodnie z numeracją zostały zmierzone mikroskopem konfokalnym



Rys. 4.17. Wykres przedstawiające wyniki pomiarów mikroskopem konfokalnym każdej ze ścian naczynia; a) ściana 1, b) ściana 2, c) ściana 3, d) ściana 4 - zgodnie z oznaczeniem na rysunku 4.16

powierzchni. Mimo różnicy około 10% w uzyskanych pomiarach zdecydowano się wykorzystać naczynie i dokonać prób pomiaru grubości warstwy wody.

4.5. POMIAR GRUBOŚCI WARSTWY WODY

Realizowany pomiar grubości warstwy wody jest o tyle charakterystyczny, że dostęp do materiału jest tylko z jednej strony. To wymaga specjalnego podejścia w celu ustalenia grubości powłoki. Podejście do przeprowadzenia pomiaru w takich warunkach zostało szczegółowo opisane w podrozdziale 2.6.3.

Na potrzeby dokonania pomiarów należy wyznaczyć współczynnik k , który określa na jakim dystansie wzdłuż osi optycznej jest ogniskowana fala o danej długości. Ten współ-

Tabela 4.3. Wyniki głębokości naczynia dla każdej ściany - zgodnie z oznaczeniem na rysunku 4.16

Ściana	Głębokość
1	262,83 μm
2	245,53 μm
3	259,08 μm
4	235,36 μm

czynnik jest wyrażany w jednostce $\mu m/nm$, co należy interpretować jako ilość mikrometrów wzdłuż osi optycznej na każdy nanometr. Owy współczynnik jest różny w zależności od wykorzystanej soczewki skupiającej. Dla soczewki *Thorlabs AL1225-A* został wyznaczony współczynnik k , co zostało opisane w równaniu 4.16.

$$k = \frac{z_{air}}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{0,3284}{650 - 500} = 2,189 \mu m/nm \quad (4.16)$$

gdzie:

z_{air} – zakres pomiarowy czujnika w powietrzu (rozdział 4.2)

λ_1, λ_2 – długości fal dla których został wyznaczony zakres pomiarowy

Nawiązując do szczegółów podrozdziału 2.6.3 jako końcowy wzór służący do wyznaczenia grubości wykorzystano zależność 4.17.

$$d = \frac{r \cdot k \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}{(f_{500} + k \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)) \cdot \tan \left[\arcsin \frac{n_1 \cdot \sin(\arctan \frac{r}{f_{500} + k \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)})}{n_2} \right]} \quad (4.17)$$

gdzie:

d – szukana grubość

r – promień soczewki; $r = 6,25 \text{ mm}$

k – współczynnik wyznaczony na podstawie równania 4.16; $k = 2,189 \mu m/nm$

f_{500} – dystans od soczewki do ogniska fali 500 nm; $f_{500} = 24,7023 \text{ mm}$

n_1 – współczynnik załamania światła powietrza; $n_1 = 1$

n_2 – współczynnik załamania światła badanego materiału; dla wody $n_2 = 1,33$

λ_1, λ_2 – szukane długości fal dla każdego odczytanego piku ze spektrum

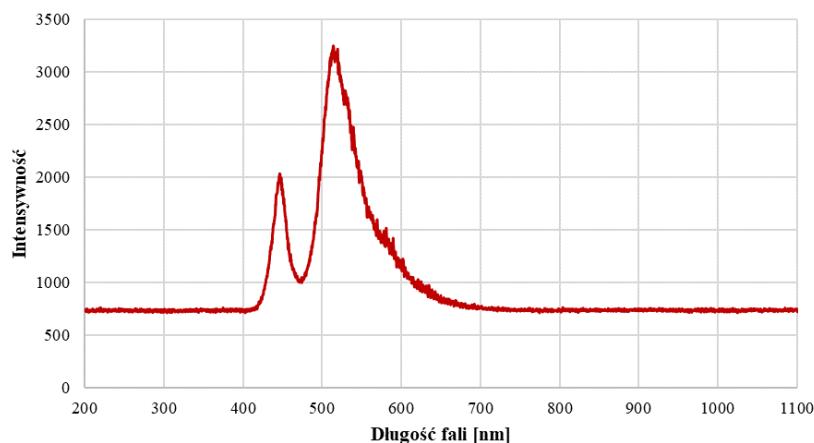
W przypadku równania 4.17 niewiadomymi są wartości λ_1 oraz λ_2 , które należy pozyścić z pobranych danych spektralnych.

Odbłyły się próby pomiaru grubości warstwy wody, która wypełniła naczynie opisane w podrozdziale 4.4. Woda z kranu charakteryzuje się wysokimi siłami napięcia powierzchniowego. Z tego powodu tafla nie miała jednakowej grubości. Im dalej od bocznych ścianek naczynia tym większa była grubość warstwy, mimo jednakowej głębokości naczynia.

Aby uzyskać warstwę o równej grubości naczynie wypełniono alkoholem izopropylowym. W tym przypadku wartość napięcia powierzchniowego jest mniejsza, a uzyskane pomiary były zbliżone zarówno na brzegu naczynia jak i na środku. Żeby zniwelować zjawisko powstawania menisku wypukłego należy zastosować naczynie o dużo większej powierzchni. Istotny jest pomiar dowolnego materiału transparentnego, ponieważ schemat działania jest taki sam bez względu czy badana jest grubość warstwy wody czy szkła. Różnica polega na innej wartości współczynnika załamania.

4.6. ODCZYT SZUKANYCH DŁUGOŚCI FAL Z DANYCH SPEKTRALNYCH

Zgodnie z zależnością przedstawioną w podrozdziale 4.5 do poprawnego wyznaczania grubości warstwy materiału istotne jest precyzyjne określenie długości fal punktów charakterystycznych na wykresie danych spektralnych. Celem jest znalezienie długości tych fal, które zostały odbite od górnej i dolnej powierzchni materiału transparentnego np. wody. Wskutek odbicia intensywność tych promieni jest szczególnie wysoka względem pozostałych przedziałów spektralnych. Dane spektralne bezpośrednio pozyskane ze spektrometru zostały przedstawione na rysunku 4.18, nie zostały one poddane żadnemu wstępнемu przetwarzaniu.



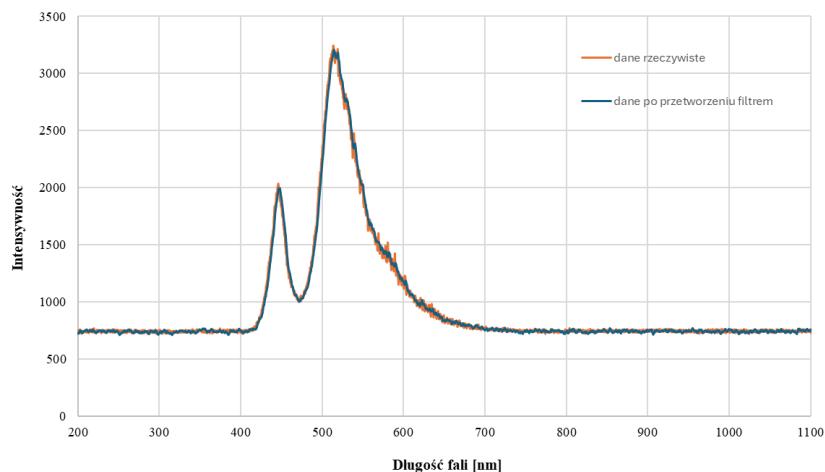
Rys. 4.18. Wykres przedstawiający dane spektralne ze spektrometru, niepoddane żadnemu przetwarzaniu

Aby wyodrębnić długości fali dla dwóch szczytów o najwyższej intensywności postanowiono zastosować dwie metody. Pierwsza metoda obejmowała zastosowanie filtra średniej ruchomej (ang. *moving average filter*), z kolei druga metoda wykorzystywała algorytmy dopasowujące krzywe do odczytanych danych rzeczywistych. Po przeprowadzeniu procedur uproszczenia danych przystąpiono do ustalenia poszukiwanych długości fal.

4.6.1. Filtr średniej ruchomej

Opisywany filtr jest wykorzystywany do wygładzania fluktuacji i eliminowania szumu danych. Jego złożoność obliczeniowa jest niska, przez co można uzyskać relatywnie dobre efekty w krótkim czasie. Filtr średniej ruchomej wyznacza średnią wartość w zadanym oknie o stałej ilości próbek. W ten sposób redukowane są wszelkie skrajne wartości i wykres danych jest bardziej wygładzony. Im większa szerokość okna tym bardziej nieczuły jest filtr na wszelkie szумy. Należy dobrą szerokość okna aby wygładzić szumy, ale również nie utracić istotnych wartości w zbiorze [69].

W przypadku omawianego zagadnienia ustalenia długości fal wykorzystano filtr o szerokości okna równej 10. Początkowo okno filtra zawierało tylko wartości równe 0. Rozpoczęcie procedury filtrowania polegało na dodaniu wartości pierwszej próbki danych na koniec tablicy 10-elementowej i usunięciu wartości na pierwszym miejscu tejże tablicy. W dalszym kroku została wyliczona średnia dla danych wewnętrz okna filtrującego. Dalej następuje iteracja po każdym elemencie i filtrowanie odbywa się w powyższy sposób.



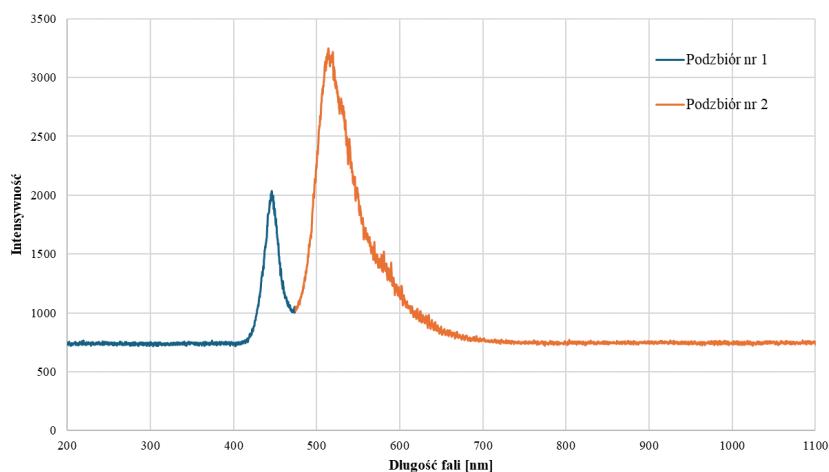
Rys. 4.19. Wykres przedstawiający wartości spektralne przed i po przetwarzaniu filtrem średniej ruchomej o oknie 10 próbek

Po przeprowadzeniu filtracji odseparowano wszystkie piki w danym zakresie spektralnym. Okno do wyznaczenia pików miało 100 próbek szerokości. Wartości wszystkich pików dodano do tablicy, a tą posortowano od największej do najmniejszej wartości. Z posortowanej tablicy zostały wybrane dwie próbki o najwyższej wartości. W kolejnym kroku indeksy dwóch wybranych wartości służą do odczytania poszukiwanych długości fal. Na ich postawie zostaje wyznaczona grubość badanej warstwy zgodnie z zależnościami przedstawionymi w podrozdziale 4.5.

4.6.2. Algorytmy dopasowania krzywych

4.6.2.1. Podział danych spektralnych

Na początku, przed przystąpieniem do procedury dopasowania krzywych do danych spektralnych wykonano kilka operacji wstępnych. Ponieważ poszukiwane są dwie wartości długości fal dane spektralne należało podzielić na dwie części (rysunek 4.20). Między dwoma charakterystycznymi pikami zostało wyznaczone lokalne minimum. Wartość na osi X odpowiadająca temu minimum jest wartością, która przedzieliła sygnał spektralny na dwa podzbiory.

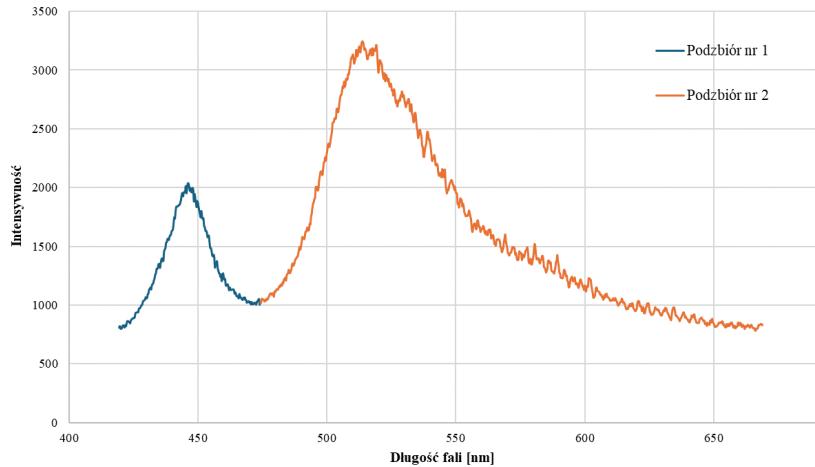


Rys. 4.20. Wykres przedstawiający dane spektralne podzielone na dwa podzbiory; kolor niebieski - podzbiór nr 1, kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2

4.6.2.2. Ograniczenie zakresu długości fali

Opisywane poniżej kroki zachodzą sekwencyjne, najpierw dopasowanie krzywej dla podzbioru nr 1, dalej dopiero operacje wstępne i dopasowanie krzywej do danych podzbioru nr 2. Następnym etapem było pomniejszenie zbiorów w celu zachowania tylko istotnych zakresów, czyli tych które zawierały pik. Dlatego zdecydowano się na ograniczenie długości fali w obydwu podzbiorach. Spektrum tła dla użytego źródła światła ma intensywność poniżej 800 jednostek. W związku z tym odcięto długości fal dla których intensywność była niższa niż 800.

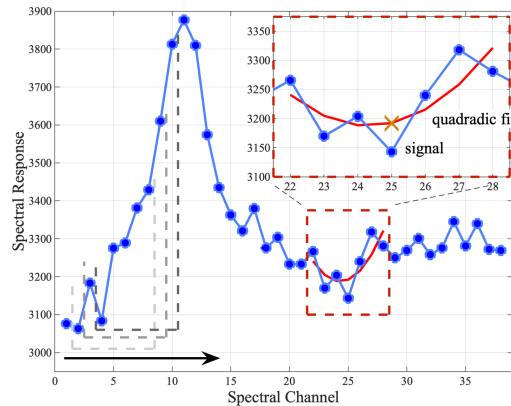
Zgodnie z przyjętym warunkiem podzbiór pierwszy został pomniejszony o wszystkie próbki, które odpowiadały długościom fal do 419 nm. Zaś w podzbiorze drugim zostały usunięte próbki, których długości fal były większe niż 668 nm. W ten sposób jest również ograniczane zbędne wykorzystanie zasobów obliczeniowych, co przekłada się na krótszy czas wykonywania kolejnych operacji przetwarzania.



Rys. 4.21. Wykres przedstawiający podzbiór w którym zostało ograniczony zakres długości fali w celu usunięcia nieistotnych próbek

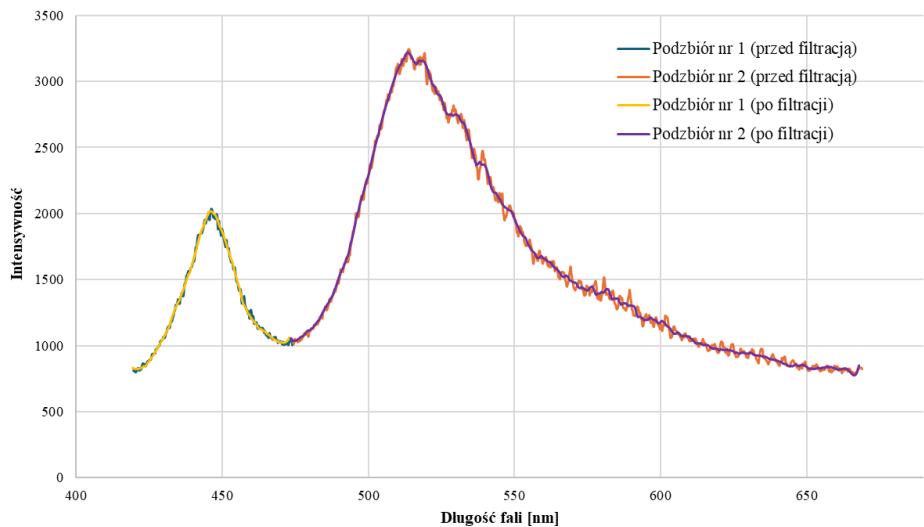
4.6.2.3. Filtr Savitzkiego-Golaya

W dalszej kolejności na uprzednio zmodyfikowanych podzbiorach wykonano zabieg filtracji. W tym celu wykorzystany został filtr Savitzkiego-Golaya. Owy filtr wygładza zakłócenia sygnału metodą najmniejszych kwadratów [70].



Rys. 4.22. Przykład przedstawiający działanie filtra Savitzkiego-Golaya; rzad wielomianu jest równy 2, a okno ma szerokość 7 próbek [70]

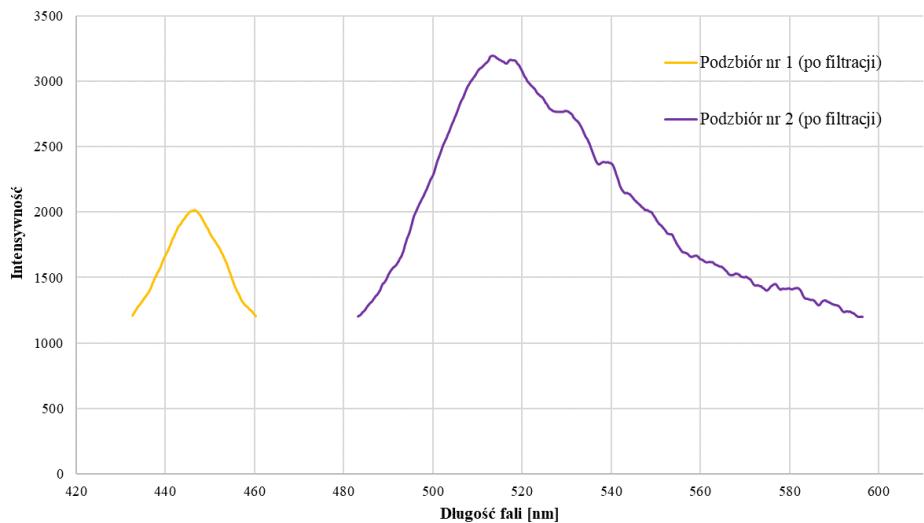
Proces wygładzania polega na obliczeniu dopasowania wielomianowego zadanego rzędu do zaszumionych danych w oknie o stałym rozmiarze. Wzrost szerokości okna powoduje większe tłumienie pików, zaś większy stopień wielomianu sprawia, że odwzorowanie jest dokładniejsze, ale dane są mniej wygładzone [70]. Przykład opisujący działanie filtra został przedstawiony na rysunku 4.22. Na podstawie prób zostało dobrany stopień wielomianu równy 3, a rozmiar okna wynosi 23 próbek. Dane spektralne poddane procesowi filtracji zostały przedstawione na wykresie 4.23.



Rys. 4.23. Wykres przedstawiający dane spektralne przed i po procesie wygładzania filtrem Savitzky-Golay; kolor niebieski - podzbiór nr 1 (przed filtracją), kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2 (przed filtracją), kolor żółty - podzbiór nr 1 (po filtracji), kolor fioletowy - podzbiór nr 2 (po filtracji)

4.6.2.4. Filtr amplitudowy

W ostatniej fazie przygotowywania sygnału do dopasowania krzywych dane zostają przetworzone przez filtr amplitudowy. Działanie takiego filtra polega na odcięciu próbek o wartościach, które nie przekraczają zadanej wartości progowej. Na potrzeby badań zastosowano filtr amplitudowy, który odcinał wartości intensywności niższe niż 1200 jednostek. Efekty działania takiego filtra dla obydwu podzbiorów są ujęte na rysunku 4.24.



Rys. 4.24. Wykres przedstawiające dane spektralne po przetwarzaniu filtrem amplitudowym; kolor żółty - podzbiór nr 1 (po filtracji), kolor fioletowy - podzbiór nr 2 (po filtracji)

4.6.2.5. Dopasowanie modeli krzywych do sygnałów

Ustalono, że w ramach badań zostaną podjęte próby dopasowania trzech modeli matematycznych w celu wybrania tego modelu, który zagwarantuje wyniki najbardziej zbliżone do wartości oczekiwanych. Wyszczególniono następujące modele [71]:

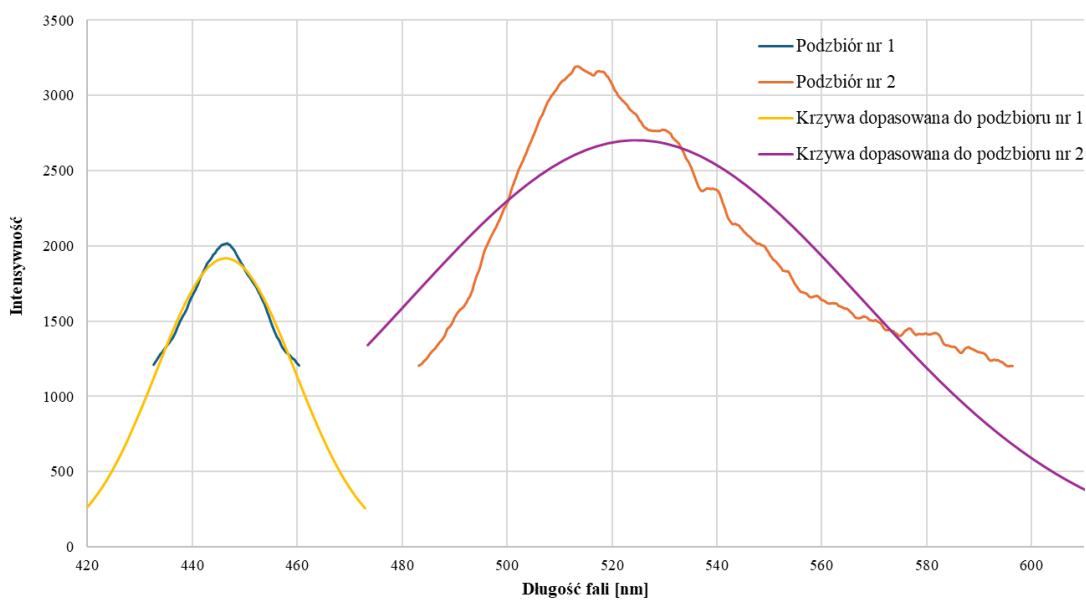
1. **rozkład Gaussa** - model matematyczny: $a_0 \cdot e^{-\ln 2 \cdot (\frac{x-a_1}{a_2})^2}$
2. **rozkład logarytmiczno-normalny** - model matematyczny: $a_0 \cdot e^{-\ln 2 \cdot (\frac{\ln(1+2 \cdot a_3 \cdot \frac{x-a_2}{a_3})}{a_3})^2}$
3. **rozkład Lorentza** - model matematyczny: $\frac{a_0}{(x-a_1)^2+a_2} + a_3$

W celu dopasowania powyższych modeli matematycznych do danych rzeczywistych zastosowano algorytm MPFit, który bazuje na algorytmie Levenberga-Marquardta. Jego zadaniem jest dopasowanie modelu nieliniowego do zbioru danych. Proces optymalizacji polega na minimalizacji sumy kwadratów różnic między danymi rzeczywistymi a modelem. Procedura dopasowywania trwa aż do osiągnięcia optymalnego rezultatu lub gdy spełnione pozostałe warunki zakończenia [72]. Dopasowanie polegało określaniu wartości współczynników a_n , gdzie $n \in 0, 1, 2, 3$ dla wybranych modeli.

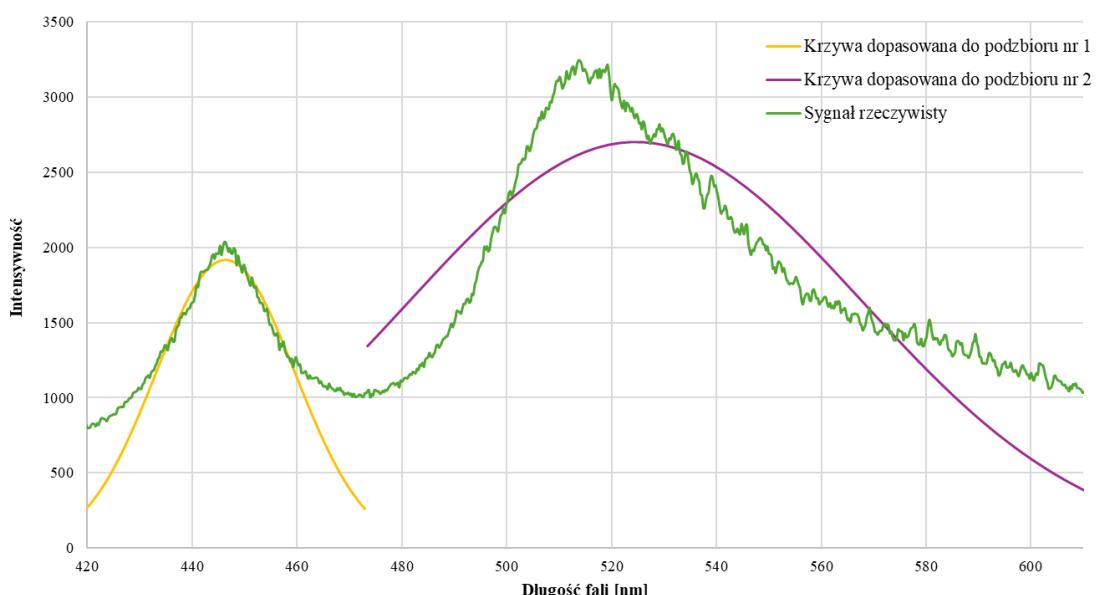
Badania obejmowały próby dopasowania każdego z powyższych modeli matematycznych do wstępnie przygotowanych danych. Określenie wartości poszukiwanych, czyli dłużości fal odbywały się przez wyznaczenie argumentu wartości maksymalnej dopasowanego modelu matematycznego. Krzywe dopasowane do dwóch podzbiorów zwracały dwie długości fali.

Rysunki 4.25 - 4.30 odnoszą się wyłącznie do konkretnych sygnałów wejściowych. Na ich podstawie można stwierdzić, że najlepiej dopasowany został model logarytmiczno-normalny, ponieważ jego krzywe dobrze odwzorowują rzeczywisty sygnał spektralny. Jednak należy uwzględnić, że najlepszy model jest wybierany przez przeprowadzenie większej ilości prób.

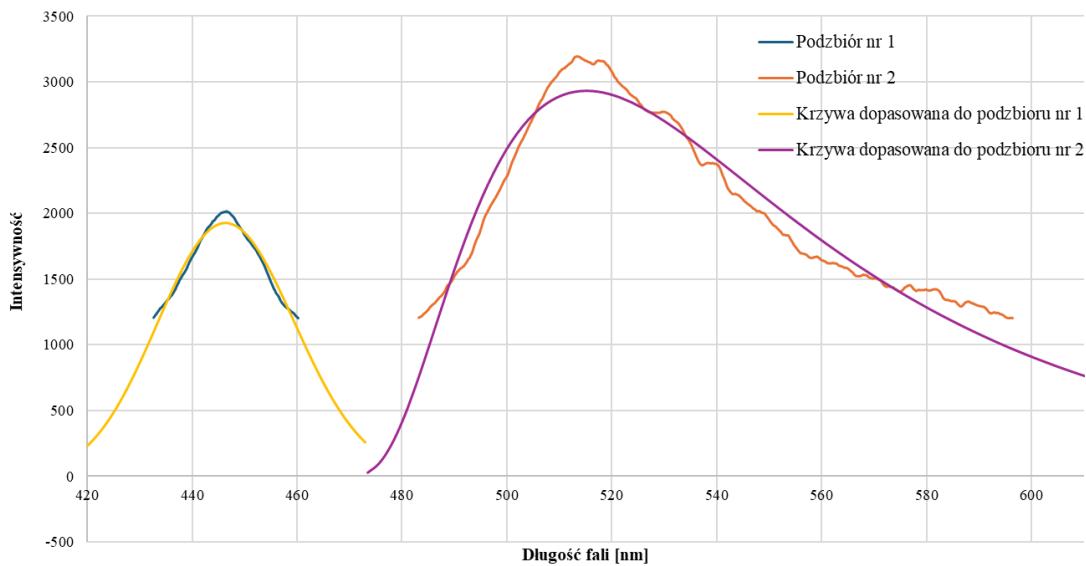
W celu odczytania poszukiwanych dłużości fal należało ustalić dla jakich argumentów wartości wyliczonego modelu matematycznego są maksymalne.



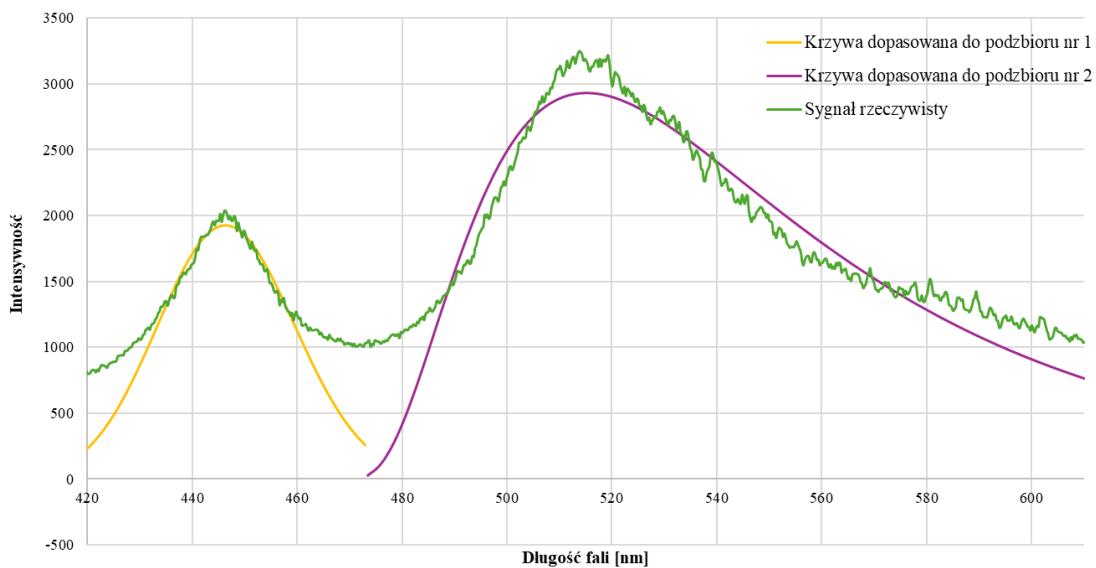
Rys. 4.25. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do danych rzeczywistych po wstępnym przetwarzaniu (**model rozkładu Gaussa**); kolor niebieski - podzbiór nr 1, kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2, kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2



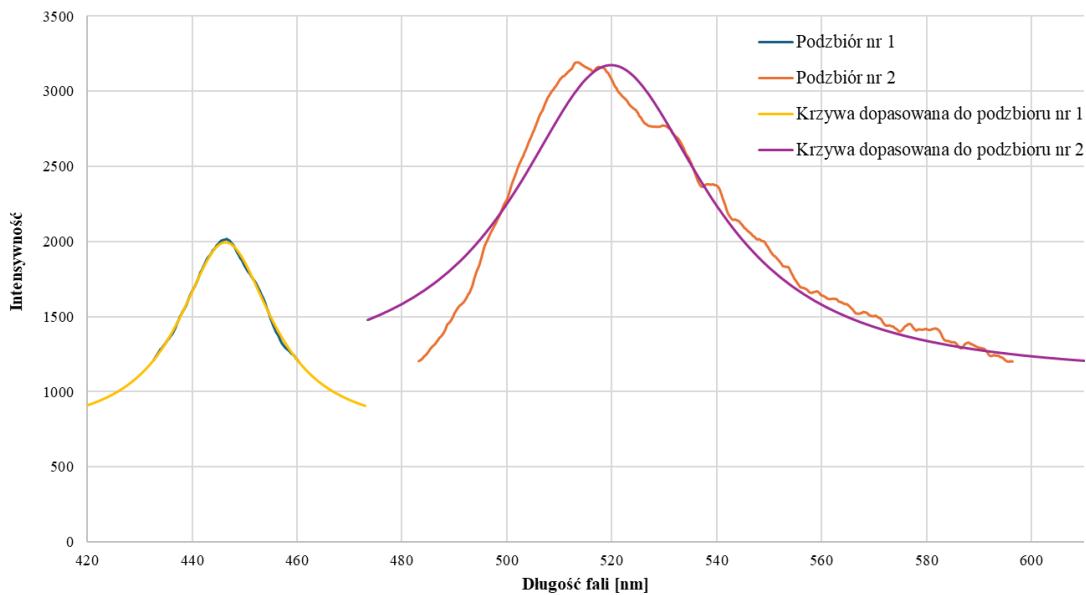
Rys. 4.26. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do wejściowych danych rzeczywistych (**model rozkładu Gaussa**); kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2, kolor zielony - wejściowe dane rzeczywiste



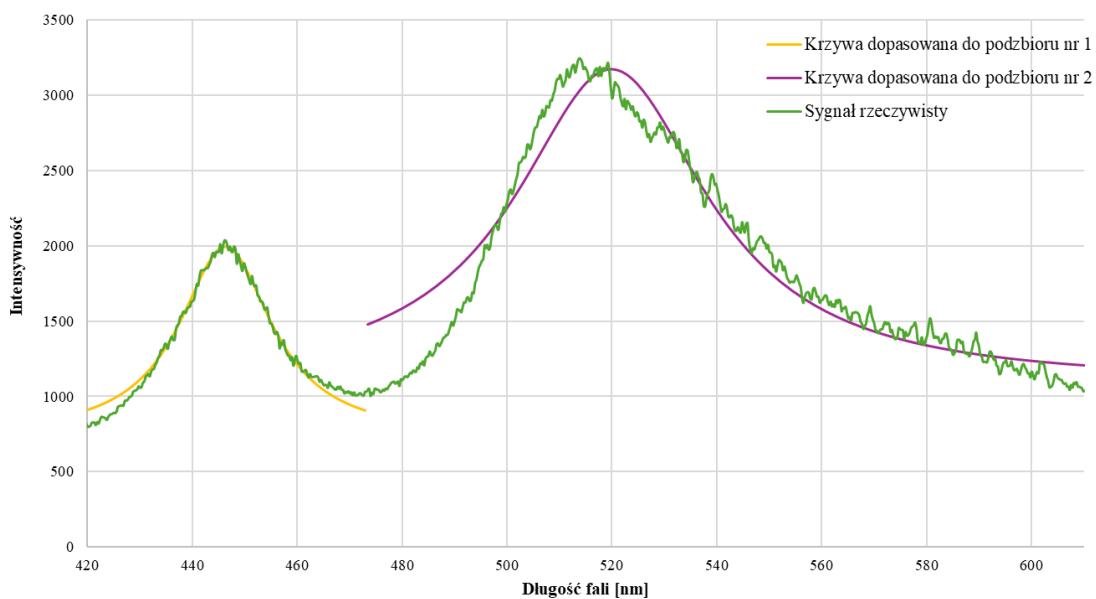
Rys. 4.27. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do danych rzeczywistych po wstępny przetwarzaniu (**model rozkładu logarytmicznie-normalnego**); kolor niebieski - podzbiór nr 1, kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2, kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2



Rys. 4.28. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do wejściowych danych rzeczywistych (**model rozkładu logarytmiczno-normalnego**); kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2, kolor zielony - wejściowe dane rzeczywiste



Rys. 4.29. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do danych rzeczywistych po wstępnym przetwarzaniu (**model rozkładu Lorentza**); kolor niebieski - podzbiór nr 1, kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2, kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2



Rys. 4.30. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do wejściowych danych rzeczywistych (**model rozkładu Lorentza**); kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2, kolor zielony - wejściowe dane rzeczywiste

4.7. WALIDACJA

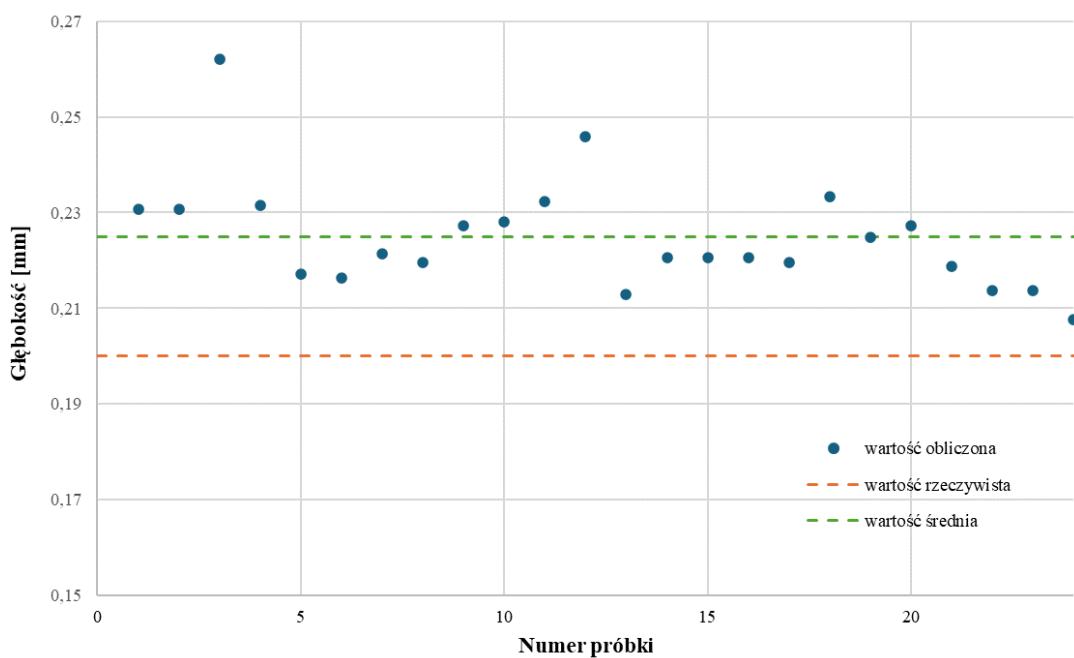
Aby określić która z zastosowanych metod zapewnia najlepsze wyniki przeprowadzono ich porównanie. W tym celu dokonano pomiarów szkła nakrywkowego o grubości 0,2 mm. Grubość szkła została zmierzona mikrometrem z dokładnością do 0,01 mm. Następnie użyto metody bazującej na filtrze średniej ruchomej oraz algorytmy dopasowania trzech modeli matematycznych, aby wyodrębnić długości fal dla charakterystycznych pików spektralnych. Pozyskane długości fali posłużą do obliczenia grubości szkła. W ten sposób stwierdzono na ile wyniki grubości dostarczone przez oprogramowanie różnią się od faktycznej grubości szkła. Została obliczona średnia, odchylenie i błąd względny dla wykonanych 24 prób pomiarowych, wyniki zawarto w tabeli 4.4. Ponadto wyniki wszystkich prób zostały przedstawione w postaci graficznej na rysunkach 4.31 - 4.34.

W tabeli 4.4 wyznaczono błąd średnich wartości dla każdej metody względem rzeczywistej wartości grubości szkła. Obliczono, że najmniejszy błąd oraz najmniejsze odchylenie charakteryzuje metodę dopasowania krzywej rozkładu Gaussa. Z kolei największy błąd dotyczył dopasowanych krzywych logarytmiczno-normalnych.

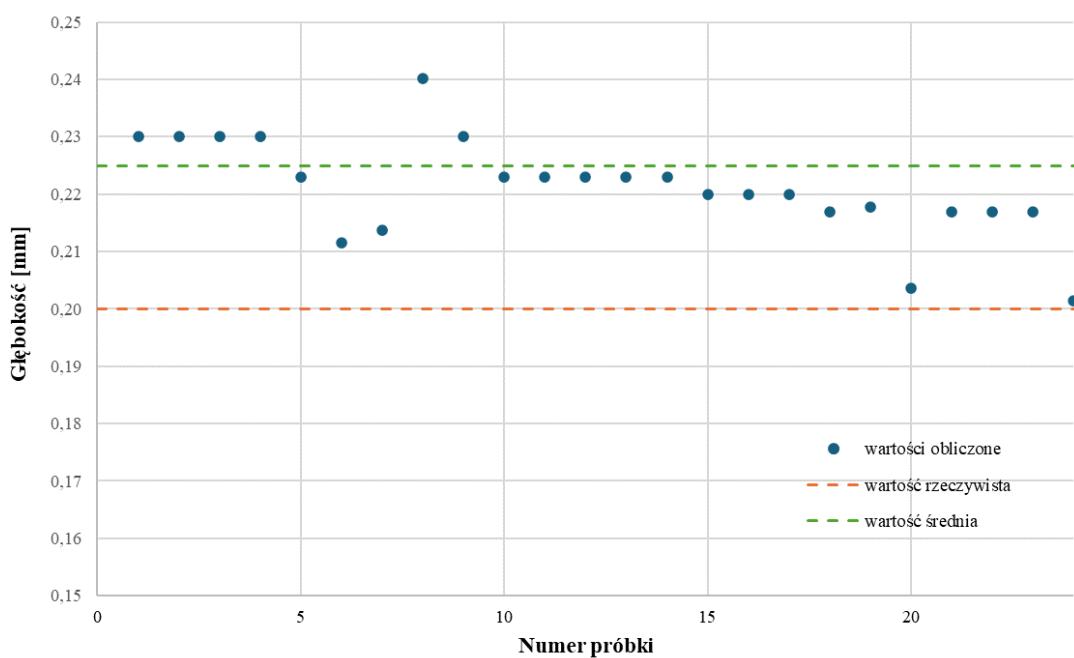
Tabela 4.5 zawiera porównanie czasów wykonywania każdej z porównywanych metod. Wszystkie metody bazujące na algorytmach dopasowania krzywej wykazały podobny średni czas wykonywania kodu.

Tabela 4.4. Zestawienie wyników grubości szkła dla każdej metody wyznaczania długości fal odbitych od górnej i dolnej powierzchni

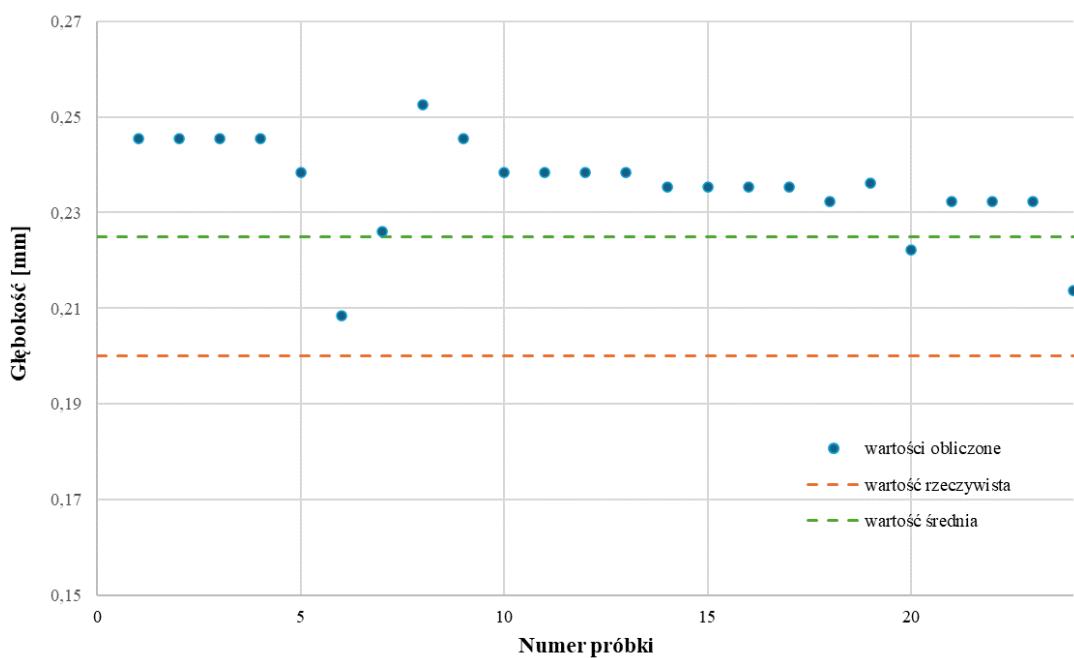
	Grubość [mm]			
Lp.	f. śr.ruch	rozkł. Gaussa	rozkł. LogNormal	rozkł. Lorentza
1	0,2307	0,2301	0,2454	0,2454
2	0,2307	0,2301	0,2454	0,2362
3	0,2621	0,2301	0,2454	0,2393
4	0,2315	0,2301	0,2454	0,2393
5	0,2171	0,2231	0,2384	0,2252
6	0,2163	0,2115	0,2084	0,2137
7	0,2214	0,2138	0,2261	0,2190
8	0,2197	0,2402	0,2525	0,2362
9	0,2273	0,2301	0,2454	0,2322
10	0,2281	0,2231	0,2384	0,2291
11	0,2324	0,2231	0,2384	0,2221
12	0,2459	0,2231	0,2384	0,2221
13	0,2129	0,2231	0,2384	0,2221
14	0,2205	0,2231	0,2353	0,2221
15	0,2205	0,2200	0,2353	0,2221
16	0,2205	0,2200	0,2353	0,2190
17	0,2197	0,2200	0,2353	0,2261
18	0,2332	0,2169	0,2322	0,2261
19	0,2247	0,2177	0,2362	0,2261
20	0,2273	0,2037	0,2221	0,2089
21	0,2188	0,2169	0,2322	0,2261
22	0,2137	0,2169	0,2322	0,2190
23	0,2137	0,2169	0,2322	0,2190
24	0,2077	0,2014	0,2137	0,2129
średnia	0,2249	0,2210	0,2353	0,2254
odchylenie	0,0031	0,0017	0,0023	0,0019
błąd	12,427%	10,514%	17,674%	12,697%



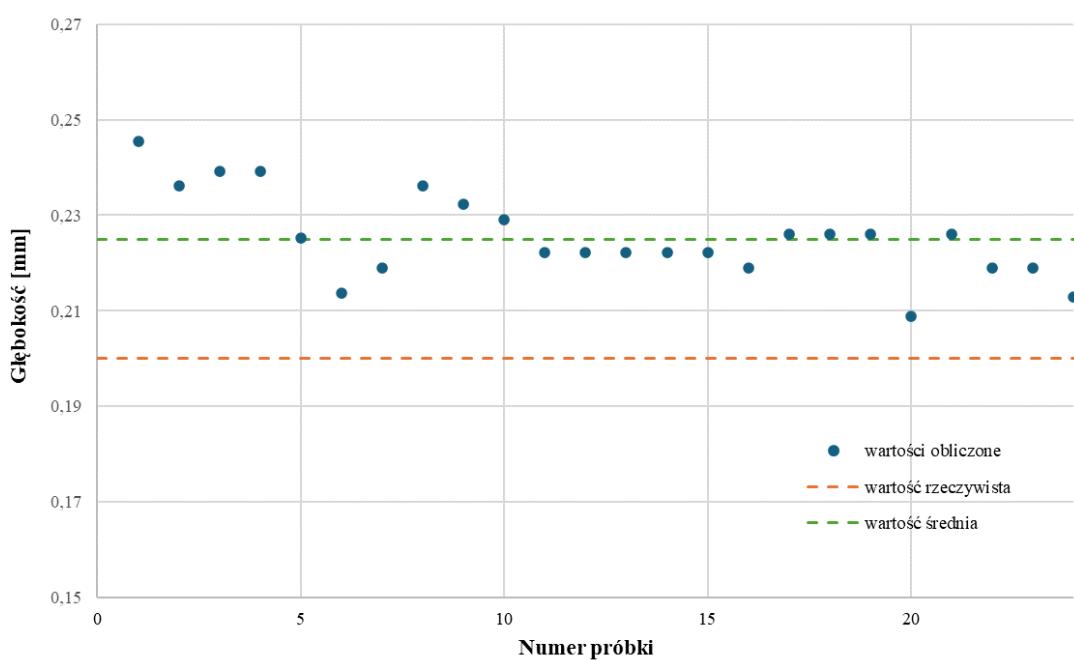
Rys. 4.31. Przedstawienie graficzne wyników grubości szkła na podstawie wykonanych pomiarów
(filtr średniej ruchomej)



Rys. 4.32. Przedstawienie graficzne wyników grubości szkła na podstawie wykonanych pomiarów
(rozkład Gaussa)



Rys. 4.33. Przedstawienie graficzne wyników grubości szkła na podstawie wykonanych pomiarów
(rozkład logarytmiczno-normalny)



Rys. 4.34. Przedstawienie graficzne wyników grubości na podstawie wykonanych pomiarów **(rozkład Lorentza)**

Tabela 4.5. Porównanie czasów wykonywania algorytmów wyznaczania szkła długości fal do obliczenia grubości szkła

Lp.	Czas wykonywania algorytmu [ms]			
	f. śr. ruch.	rozkł. Gaussa	rozkł. LogNormal	rozkł. Lorentza
1	106	137	149	155
2	103	159	161	177
3	99	142	153	166
4	141	193	110	133
5	122	188	161	133
6	109	198	132	181
7	113	126	105	141
8	116	112	175	157
9	141	120	186	179
10	160	175	159	212
średnia	121	155	149,1	163,4

4.8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI DOTYCZĄCE CZĘŚCI BADAWCZEJ

Na podstawie uzyskanych rezultatów dla 24 przeprowadzonych prób pomiarowych zostały wyznaczone średnie i odchylenia dla każdej z metod wyekstrahowania długości fal. Długości fali były podstawiane do równania 4.17, aby uzyskać wartość grubości szkła nakrywkowego. Wartości średnie posłużyły do obliczenia błędu względem rzeczywistej grubości. Zgodnie z wyznaczonymi wskaźnikami ustalono, że metoda działająca w oparciu o algorytm dopasowania krzywej rozkładu Gaussa zapewnia najmniejszy błąd spośród wszystkich badanych metod (tabela 4.4). Także wartość odchylenia jest na najniższym poziomie. Graficzne zestawienie wyników dla tejże metody zostało przedstawione na rysunku 4.32.

Różnice dotyczące otrzymanych wartości wynikają z różnych czynników. W przypadku metod bazujących na algorytmach dopasowania krzywych podlegały one dopasowaniu do danych rzeczywistych w określonej liczbie iteracji. Każdy przypadek wymaga różnej liczby iteracji, aby ustalić optymalne wartości współczynników dopasowywanych modeli matematycznych. Na potrzeby badań określono, że maksymalna liczba iteracji wyniesie 1000. Istnieje możliwość, że zostaną przetwarzane takie sygnały dla których ustalona maksymalna liczba iteracji będzie za niska. Im więcej iteracji tym większe zużycie zasobów obliczeniowych. Należy ustalić kompromis między dokładnością pomiaru a czasem przetwarzania algorytmu co jest skutkiem zużycia większej ilości zasobów obliczeniowych.

W przypadku przedstawionego sposobu pomiaru grubości szkła istotną rolę odgrywa wartość współczynnika załamania światła. Dla tego konkretnego przypadku przyjęto, że wartość ta wynosi 1,4585. Jednakże taki współczynnik należałoby wyznaczyć doświadczalnie w ustalonych warunkach, aby mieć pewność jaką jest jego rzeczywista wartość.

Przeprowadzone badania dotyczyły ustalenia grubości dla 24 prób pomiarowych.

W celu uzyskania rezultatów o większej dokładności warto byłoby przeprowadzić badania porównawcze dla większej ilości pomiarów. Im więcej pomiarów tym mniejsze zaburzenia średniej wartości, która była wykorzystana do wyliczenia błędu pomiarowego.

Warto również podkreślić istotę zakłóceń zewnętrznych. Wykorzystany system optyczny jest wrażliwy na zmiany zewnętrznego oświetlenia oraz drgania. W celu uzyskania optymalnych sygnałów spektralnych należałoby dokonać pomiarów zapewniając odpowiednie warunki pracy systemu.

Innym czynnikiem, który może mieć potencjalny wpływ na występujący błąd pomiaru może być nie w pełni poprawna kalibracja systemu optycznego. Doświadczalnie przeprowadzono procedury kalibracji układu, ale należy wziąć pod uwagę, że manualna kalibracja nie zapewnia w pełni idealnych warunków i wiązka nie jest skierowana ortogonalnie do badanych płaszczyzn.

Uzyskane wyniki dotyczyły obliczonej grubości szkła nakrywkowego na podstawie pomiarów spektralnych. Wpływ na odczytany sygnał spektralny ma rozdzielcość spektrometru. Dokładność odwzorowania danych spektralnych wynika z rozdzielcości detektora czujnika. Zapewniając wyższą dokładność pobranego spektrum wyznaczona wartość grubości będzie bardziej zbliżona do rzeczywistej.

Poza dokładnością każdej metody sprawdzono również czasy ich wykonywania (tablica 4.5). Metody bazujące na dopasowywaniu krzywych wykorzystywały ten sam algorytm MPFit, jednakże była różna ilość współczynników zawartych w badanych modelach matematycznych. Według przeprowadzonych porównań najszybciej wykonywała się metoda wykorzystująca filtr średniej ruchomej. Jednak różnice czasowe między wszystkimi metodami nie były znacząco różne, dlatego nie uwzględniono tych wyników jako istotne do końcowego wyboru implementowanej metody. Należy także uwzględnić, że czas wykonywania każdego algorytmu zależy od posiadanych zasobów obliczeniowych oraz od ich chwilowego zużycia.

Podsumowując, po przeprowadzeniu badań zdecydowano się na zaimplementowanie algorytmu bazującego na dopasowaniu krzywej rozkładu Gaussa w celu wyznaczenia poszukiwanych długości fal, aby finalnie móc określić wartość grubości materiału transparentnego. Ten algorytm zapewnił najmniejszy błąd względny i odchylenie spośród wszystkich testowanych metod.

5. PODSUMOWANIE

Systemy laserowe stanowią coraz większą część w różnych gałęziach przemysłu z racji szeregu zalet, charakteryzują się zachowaniem wysokiej dokładności i powtarzalności. Obróbka laserowa metali obejmuje procesy m. in. spawania, napawania, hartowania, cięcia lub grawerowania.

W procesie grawerowania ważne jest precyzyjne wykonanie żłobienia w materiale zachowując jego pożądaną pozycję oraz głębokość. Wiązka laserowa skupia się na grawerowanym metalu, który absorbuje wysoką wartość energii i osiąga temperaturę parowania. Wtedy dochodzi do ablacji laserowej i materiał przechodzi bezpośrednio ze stanu stałego w stan gazowy. Metal w ciekłej postaci znajduje się jedynie krawędziach powstałego zagłębienia, a następnie jest wypychany przez ciśnienie parującego materiału na zewnątrz. W wyniku burzliwego przebiegu wypychania materiału dochodzi do jego rozprysku wokół strefy obrabianej. Zazwyczaj chcąc zachować wysoką jakość powierzchni zachodzi konieczność stosowania obróbki mechanicznej.

Pomysłem na zniwelowanie tego niepożądanej efektu jest obróbka metalu pokrytego cienką warstwą wody. Wtedy jednak dochodzi do propagacji wiązki laserowej przez wspomnianą ciecę. Dlatego należy ustalić grubość tej warstwy, aby móc wprowadzić kompensację pochłoniętej energii i wzmacnić parametry wiązki bazowej.

Pomiar grubości warstwy wody odbywał się przy użyciu konfokalnego czujnika chromatycznego. Zjawiskiem wykorzystywanym przez ten sensor jest aberracja chromatyczna podłużna, w wyniku której promienie o konkretnej długości fali ogniskują się na górnej i dolnej powierzchni badanej warstwy cieczy.

W ramach niniejszej pracy wykonano oprogramowanie, które kontroluje peryferia projektowanego czujnika, spektrometr i platformę laboratoryjną. Równanie opisujące grubość warstwy materiału transparentnego wynika z szeregu parametrów i zależności wykorzystanego systemu optycznego. Na potrzeby określenia grubości należało odczytać charakterystyczne długości fal z odczytanego sygnału spektralnego.

Bazując na danych odczytanych przez detektor czujnika przeprowadzono badania porównawcze metod odpowiedzialnych za określenie poszukiwanych zmiennych. W tym celu zebrano dane spektralne i dokonano przetwarzania metodami filtra średniej ruchomej oraz algorytmami odpowiedzialnymi za dopasowanie krzywych rozkładu Gaussa, Lorentza i logarytmiczno-normalnego. Na podstawie wyznaczonych zmiennych została obliczona grubość szkła. Wartość obliczoną zestawiono z grubością rzeczywistą szkła nakrywkowego, które posłużyło do walidacji działania oprogramowania. Na podstawie otrzymanych wyni-

ków stwierdzono, że algorytm dopasowujący krzywą rozkładu Gaussa wykazał najmniejszy błąd około 11% i najniższą wartość odchylenia. Z tego powodu zdecydowano się na jego implementację w finalnym rozwiązaniu.

W ramach pracy poruszone zostały kwestie związane z poszczególnymi składowymi, które w efekcie złożyły się na cel końcowy - wyznaczenie grubości warstwy materiału. Dotyczyły one parametrów wykorzystywanego układu optycznego, jak również konkretnej metodyki przetwarzania danych przez przygotowane oprogramowanie.

Obecny stan układu badawczego oraz wytworzone oprogramowanie zapewniają lepszą dokładność niż niektóre rozwiązania (np. czujnik ultradźwiękowy) przedstawione w ramach przeglądu literatury. Jednak porównując budowany czujnik chromatyczny z rozwiązaniami dostępnymi na rynku rozdzielcość nie jest na tak wysokim poziomie. Problem związany z stosunkowo gorszą dokładnością niż gotowe rynkowe rozwiązania dotyczy szeregu kwestii, które mogą wpływać na odczytany sygnał spektralny. W celu uzyskania lepszych rezultatów należałoby przeprowadzić pomiary w środowisku wolnym od zewnętrznych zakłóceń. Oprócz tego rozdzielcość spektrometru wpływa na dokładność pobranego sygnału, który jest przetwarzany. Ważne jest również dokładne skalibrowanie systemu optycznego w celu uzyskania wiązki prostopadłej do powierzchni w celu uzyskania pomiarów o lepszym odwzorowaniu.

Podsumowując, projekt w obecnej fazie jest w stanie określić grubość materiału transparentnego z błędem na poziomie 11%, ale ma potencjał do rozwoju w przyszłości. Z pewnością bazując na wnioskach płynących z niniejszej pracy uzyskanie lepszych rezultatów jest osiągalne. Szerokie potrzeby technologiczne w różnych dziedzinach przemysłu dają szansę temu rozwiązaniu na zastosowanie go w praktyce.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Zimny. *Laserowa obróbka stali*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 1999.
- [2] J. Dutta Majumdar, I. Manna. Laser processing of materials.
https://www.researchgate.net/publication/226212663_Laser_processing_of_materials, 2009. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [3] J. Pilarczyk, S. Stano, M. Banasik, J. Dworak. Wykorzystanie technik laserowych do spawania elementów o małych wymiarach w centrum laserowym instytutu spawalnictwa.
https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAR0-0060-0094/c/httpwww_bg_utp_edu_plartpe42011pe4-2011207-216.pdf, 2011. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [4] L. Lazov, H. Deneva, P. Narica. Laser marking methods.
https://www.researchgate.net/publication/281192318_Laser_Marking_Methods, 2015. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [5] https://www.trumpf.com/en_GB/solutions/applications/laser-marking/laser-engraving/. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [6] [https://www.cambridge.org/core/journals/laser-and-particle-beams/article/abs/scanning-electron-microscope-studies-on-laser-ablation\of-solids/7F58C70870658FAD8827C0EA4AB9AEB8](https://www.cambridge.org/core/journals/laser-and-particle-beams/article/abs/scanning-electron-microscope-studies-on-laser-ablation-of-solids/7F58C70870658FAD8827C0EA4AB9AEB8). (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [7] R. Romaniuk. Technika laserowa.
https://www.researchgate.net/publication/365001432_Laser_Technology, 2020. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [8] G. T. Schuster. Basic principles of wave propagation.
<https://csim.kaust.edu.sa/files/Short.Courses/BasicSeismology.pdf>, 2011. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [9] D. Malacara, Z. Malacara. *Handbook of Optical Design*. 2004.
- [10] W. Zhang, Z. Chen, X. Zhang, C. Wang, B. He. Dispersion measurement with optical computing optical coherence tomography.
<https://www.mdpi.com/2304-6732/9/1/48>, 2020. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [11] <https://www.medianauka.pl/odbicie-refrakcja>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [12] M. Schwartz. Refraction and reflection.
<https://scholar.harvard.edu/files/schwartz/files/lecture15-refraction.pdf>. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [13] T. V Vorburger, R. Silver, B. Brodmann, R. Brodmann. Light scattering methods.
https://www.researchgate.net/publication/283363880_Light_Scattering_Methods, 2011. (dostęp: 30.01.2024 r.).

- [14] https://pl.wikipedia.org/wiki/Rozpraszanie_%C5%9Bwiat%C5%82a#/media/Plik:Diffusion_rayleigh_et_diffraction.png. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [15] Z. Kęcki. *Podstawy spektroskopii molekularnej*. 1992.
- [16] Dr. Thomas G. Mayerhöfer. The bouguer-beer-lambert law: Shining light on the obscure. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cphc.202000464>, 2020. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_absorption_by_water#/media/File:Absorption_spectrum_of_liquid_water.png. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [18] <https://www.hans-schmidt.com/en/produkt-details/thickness-gauge-k-50/>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [19] <https://www.acuitylaser.com/by-measurement-type/thickness-measurement/>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [20] R. I. Hartley, P. Sturm. Triangulation. <https://users.cecs.anu.edu.au/~hartley/Papers/triangulation/triangulation.pdf>. (dostęp: 30.01.2024 r.).
- [21] Katalog produktowy czujników laserowych triangulacyjnych marki Sick. Triangulacyjne czujniki laserowe niezmiennie wysoka jakość produktu dzięki precyzyjnym, optycznym pomiarom odległości. https://cdn.sick.com/media/docs/1/71/471/product_information_laser_triangulation_sensors_dt20_hi_od_value_od1000_od_mini_od_max_od_precision_od5000_pl_im0081471.pdf. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [22] <https://www.automatyka.pl/produkty/-wobit-laserowy-\triangulacyjny-czujnik-przemieszczenia-ild2300-micro-epsilon-72953-2>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [23] Katalog produktowy czujników laserowych triangulacyjnych marki MicroEpsilon. optoncdt // laser displacement sensors (triangulation). <https://wobit.com.pl/download/cat--optoncdt--en.pdf>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [24] https://www.researchgate.net/figure/Laser-triangulation-principle_fig1_309321161. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [25] J. Hosek, P. Linduska. Simple modification of a commercial laser triangulation sensor for distance measurement of slot and bore side surfaces. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/20/6911>, 2021. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [26] R. Saddoud, N. Sergeeva-Chollet, M. Darmon. Eddy current sensors optimization for defect detection in parts fabricated by laser powder bed fusion. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/9/4336>, 2023. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [27] <https://control.com/technical-articles/vibration-sensors-for-\use-in-condition-monitoring/>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [28] Katalog produktowy czujników wiroprowadowych marki MicroEpsilon. eddynct // inductive sensors based on eddy currents. <https://www.micro-epsilon.com/fileadmin/download/products/cat--eddyNCDT--en.pdf>. (dostęp: 31.01.2024 r.).

- [29] K. Handzic. The ultimate guide to measuring coating thickness.
<https://finishingandcoating.com/index.php/powder-coat/878-the-ultimate-guide-to-measuring-coating-thickness>, 2021. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [30] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157820304547#f0035>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [31] Strona produktowa firmy Balluff. Czujniki ultradźwiękowe z wyjściem cyfrowym.
<https://www.balluff.com/pl-pl/products/areas/A0001/groups/G0104/products/F01405>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [32] S. Yang, G. Zhang. A review of interferometry for geometric measurement.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/aad732>, 2018. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [33] https://pl.m.wikipedia.org/wiki/Plik:Michelson_interferometer_with_labels.svg. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [34] N. Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/4/9/001>, 1993. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [35] https://lnf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Spectroscopic_reflectometry. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [36] <https://pl.lambdageeks.com/thin-film-interference-notes-problems-applications/>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [37] M. Zeppieri, S. Marsili, E. Enaholo, A. Shuaibu. Optical coherence tomography: A brief look at the uses and technological evolution of ophthalmology.
<https://www.mdpi.com/1648-9144/59/12/2114>, 2023. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [38] <https://www.environmental-expert.com/products/nanofilm-model-ep4-imaging-ellipsometer-670930>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [39] J.Zhang, L. Shi, R. Zhang, J. Chen. Spectral interference ellipsometry for film thickness measurement on transparent substrate.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816623003482?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=83fd6f895af1bfc1, 2023. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [40] <https://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/138874-Spectroscopic-Ellipsometry-Characterization-of-Thin-Films-Used-in-the-Food-Packaging-Industry/>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [41] B. Hajduk, P. Jarka, P. Nitschke. Badanie rozkładu grubości powierzchni cienkich warstw metodą elipsometrii spektroskopowej.
<https://www.pimib.polsl.pl/pdf/lab/20.pdf>, 2019. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [42] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-a-spectroscopic-ellipsometry-set-up-reproduced-from-129-with_fig19_343911996. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [43] J.Masajda, J.Nowak, M.Zajac. *On correction of chromatic aberration*. 1999.

- [44] J. Ho. Chromatic aberration: A new tool for colour consistency.
<https://core.ac.uk/download/pdf/56369695.pdf>, 1986. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [45] W. Kapłonek, M. Sutowska, M. Ungureanu. Optical profilometer with confocal chromatic sensor for high-accuracy 3d measurements of the uncirculated and circulated coins.
<https://jmee.tu.koszalin.pl/ojs/index.php/jmee/article/view/65>, 2023. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [46] <https://e.sentech.nl/en/news/optical-precision-to-the-nanometre>. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [47] D. W. Zhou. Measurement of water falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensing technique.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177708001337>, 2009. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [48] S. Fu, W. S. Kor, F. Cheng, L. K. Seah. In-situ measurement of surface roughness using chromatic confocal sensor.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120313214>, 2020. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [49] Q. Yu, K. Zhang, C. Cui, R. Zhou. Method of thickness measurement for transparent specimens with chromatic confocal microscopy.
https://www.researchgate.net/publication/328966105_Method_of_thickness_measurement_for_transparent_specimens_with_chromatic_confocal_microscopy, 2018. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [50] W. Yunquan, C. Suping, Z. Wenhan, j. Xiangqian. Measurement of thickness and refractive index of transparent material synchronously based on chromatic confocal sensor.
https://opg.optica.org/directpdfaccess/8fd601d0-02bd-4065-\8e4b48063a306e79_544100/oe-31-26-42754.pdf?da=1&id=544100&seq=0&mobile=no, 2023. (dostęp: 31.01.2024 r.).
- [51] Lm80kiqp czujnik fotoelektryczny – czujnik laserowy, odbiciowy rozproszeniowy (triangulacyjny). <https://www.turck.pl/pl/product/3807393>. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [52] optoncdt // laser displacement sensors (triangulation). <https://wobit.com.pl/download/cat--optoncdt--en.pdf>. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [53] Sick - triangulacyjne czujniki laserowe. https://www.sick.com/media/docs/1/71/471/Product_information_Laser_Triangulation_Sensors_DT20_Hi_OD_Value_OD1000_OD_Mini_OD_Max_OD_Precision_OD5000_pl_IM0081471.PDF. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [54] eddynct // inductive sensors based on eddy currents. <https://www.micro-epsilon.com/fileadmin/download/excerpts/dax--eddyNCDT-3001--en-us.pdf>. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [55] Czujnik wiroprowadowy ecl 101. <https://www.ita-polska.com.pl/automatyka-pomiarowa-i-inspekcjna/czujniki-wiroprowadowe-lion-precision/ecl-101>. (dostęp: 15.05.2024 r.).

- [56] Ultrasonic sensor uc4000-l2-i-v15. <https://www.automatyka24.pl/file/32529,277770%20-%20UC4000-L2-I-V15.pdf>. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [57] Czujniki ultradźwiękowe bus m18m1-gpxi-03/025-s92g-511. <https://publications.balluff.com/pdfengine/pdf?type=pdb&id=285292&con=pl>. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [58] interferometer ims5400-th // white light interferometer for high precision thickness measurement. <https://wobit.com.pl/download/dat--interferometer-ims5400-th--en.pdf>. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [59] Gartner 1115s-8 specifications. <https://bpb-us-e1.wpmucdn.com/sites.psu.edu/dist/d/80834/files/2020/03/Ellipsometer-details.pdf>. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [60] confocaldt // confocal chromatic sensor system. <https://wobit.com.pl/download/cat--confocaldt--en.pdf>. (dostęp: 15.05.2024 r.).
- [61] Tworzenie aplikacji windows forms w programie visual studio przy użyciu języka c. <https://learn.microsoft.com/pl-pl/visualstudio/ide/create-csharp-winform-visual-studio?view=vs-2022>. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [62] Backgroundworker klasa. <https://learn.microsoft.com/pl-pl/dotnet/api/system.componentmodel.backgroundworker?view=netframework-4.8>. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [63] Mintf4 - 554 nm, 21 mw (min) fiber-coupled led, 1225 ma, sma. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MINTF4>. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [64] N-bk7 high precision windows. https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9_PF.cfm?Guide=10&Category_ID=185&ObjectGroup_ID=1117. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [65] AL1225-a - Ø12.5 mm n-bk7 aspheric lens, f=25 mm, na=0.23, arc: 350-700 nm. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=AL1225-A>. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [66] Hr4000 high resolution spectrometer, ocean optics. https://www.photonicsolutions.co.uk/upfiles/HR4000_Product_Sheet.pdf. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [67] L490mz/m - motorized lab jack, 50.8 mm travel, m6 taps. <https://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=L490MZ/M>. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [68] Refractive index database. <https://refractiveindex.info/>. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [69] Zastosowanie filtrów wygładzających do estymacji współczynnika snr w sygnałach zakłóconych szumem o rozkładzie normalnym. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-c5f8cfb7-9fd2-42f3-a82e-c008f34c9260/c/mikolajczak_grzegorz_zastosowanie_88_2016.pdf. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [70] Neal B. Gallagher. Savitzky-golay smoothing and differentiation filter. <https://eigenvalue.com/wp-content/uploads/2020/01/SavitzkyGolay.pdf>, 2020. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [71] fityk - curve fitting, data analysis - models. <https://fityk.nieto.pl/model.html>. (dostęp: 12.06.2024 r.).
- [72] Henri P. Gavin. The levenberg-marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems. <https://people.duke.edu/~hpgavin/lm.pdf>, 2024. (dostęp: 12.06.2024 r.).

SPIS RYSUNKÓW

1.	Schemat przedstawiający przebieg procesu grawerowania laserowego [5]	4
2.	Zdjęcia mikroskopowe przedstawiające rozprysk obrabianego materiału w wyniku obróbki laserowej [6]	5
1.1.	Załamanie fali przechodzącej z ośrodka 1 do ośrodka 2; α - kąt padania, β - kąt załamania [11]	9
1.2.	Odbicie fali elektromagnetycznej od powierzchni obiektu; α - kąt padania, β - kąt odbicia [11]	10
1.3.	Rozproszenie fal elektromagnetycznych w wyniku oddziaływania cząsteczek materii [14]	10
1.4.	Wykres przedstawiający zależność absorpcji światła przez wodę od długości fali [17] .	11
2.1.	Pomiar grubości w sposób bezpośredni; a) pomiar przy użyciu czujnika zegarowego, b) pomiar przy użyciu dwóch przeciwnie skierowanych czujników laserowych [18, 19]	13
2.2.	Przedstawienie problemu pomiarowego grubości warstwy wody	14
2.3.	Czujnik laserowy triangulacyjny marki Micro Epsilon optoNCDT [22]	15
2.4.	Schemat obrazujący zasadę działania czujnika laserowego triangulacyjnego [24] . .	15
2.5.	Schemat obrazujący zasadę działania czujnika laserowego triangulacyjnego [25] . .	16
2.6.	Schemat przedstawiający zasadę działania czujnika wiopropadłowego [27]	17
2.7.	Schemat obrazujący układ pomiaru grubości warstwy wody z użyciem czujnika laserowego triangulacyjnego oraz czujnika wiopropadłowego	18
2.8.	Schemat obrazujący pomiaru grubości warstwy wody z użyciem czujnika ultradźwiękowego [30]	19
2.9.	Schemat przedstawiający szczegółową budowę interferometru Michelsona [33] . . .	20
2.10.	Przedstawienie przebiegu odbicia emitowanych fal świetlnych w celu określenia grubości warstwy materiału [35]	21
2.11.	Przykłady interferencji fal zachodzących po odbiciu od badanych warstw materiału; a) interferencja konstruktywna, b) interferencja destruktywna [36]	21
2.12.	Przyrząd elipsometryczny służący do pomiaru grubości materiału [38]	22
2.13.	Zasada działania elipsometru [40]	23
2.14.	Zasada działania elipsometru, przedstawienie składowych parametrów pomiarowych na schemacie [42]	23
2.15.	Aberracja chromatyczna zachodząca w ognisku soczewki - a) podłużna, b) poprzeczna [45]	24
2.16.	Schemat przedstawiający budowę konfokalnego czujnika chromatycznego [46] . . .	25
2.17.	Przykładowe wartości odczytywane przez detektor czujnika chromatycznego, każda krzywa przedstawia inną odległość od powierzchni	26

2.18. Wykres przedstawiający zależność między odległością w zakresie ogniskowanej dyspersji chromatycznej a długością fali [49]	27
2.19. Szczegółowy schemat przedstawiający cechy geometryczne zakresu ogniskowanych promieni w wyniku aberracji chromatycznej; r - promień soczewki skupiającej, n - współczynnik załamania światła dla powietrza, n_1 - współczynnik załamania światła materiału transparentnego, θ_2 - kąt wypadkowy fali o długości λ_2 , θ'_2 - kąt załamania fali o długości λ_2 , θ - kąt wypadkowy fali o długości λ , θ' - kąt załamania fali o długości λ , h_0 - odległość między najwyższą ogniskową a soczewką, h_1 - pierwotny zakres dyspersji chromatycznej, h_2 - dystans między najniższą ogniskową przed załamaniem i najniższą ogniskową po załamaniu [49]	28
2.20. Szczegółowy schemat przedstawiający metodę pomiaru grubości wykorzystującą zewnętrzny reflektor; H - grubość badanej próbki, n- współczynnik załamania światła danego ośrodka, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - poszczególne promienie o danych długościach fal, $\theta(\lambda_1), \theta(\lambda_2), \theta(\lambda_3)$ - kąty załamania danych fal, $\theta'(\lambda_1), \theta'(\lambda_2), \theta'(\lambda_3)$ - kąty wypadkowe załamania danych fal [50]	29
2.21. Procedura wyznaczania wartości $l(\lambda_2) - l(\lambda_1)$ oraz $l(\lambda_3) - l(\lambda_2)$; a) fale zogniskowane na przednią i tylną powierzchnię materiału, b) fale zogniskowane na powierzchni reflektora po przejściu przez materiał transparentny, c) fale zogniskowane na bezpośrednio powierzchni reflektora po usunięciu materiału [50]	31
 3.1. Zrzut ekranu przedstawiający interfejs graficzny utworzonej aplikacji; wydzielone sekcje interfejsu zostały ponumerowane	33
3.2. Interfejs graficzny sekcji obsługi spektrometru w opracowywanej aplikacji	34
3.3. Dynamiczna zmiana parametrów elementów w zależności od bieżącego stanu komunikacji ze spektrometrem	35
3.4. Wykres bieżących danych spektralnych wraz z wyznaczeniem długości fali o maksymalnej intensywności	35
3.5. Elementy umożliwiające modyfikację parametrów pomiaru przez użytkownika oraz zapis bieżącego spektrum do pliku CSV	36
3.6. Interfejs graficzny sekcji obsługi platformy laboratoryjnej w opracowywanej aplikacji	36
3.7. Dynamiczna zmiana parametrów elementów w zależności od bieżącego stanu komunikacji z platformą laboratoryjną	36
3.8. Interfejs graficzny sekcji pomiaru grubości materiału w opracowywanej aplikacji . .	37
3.9. Wykres danych spektralnych z oznaczonymi pikami powstałymi w wyniku odbicia fal	38
3.10. Dynamiczna zmiana zawartości elementu w zależności obecnego statusu pomiaru grubości materiału	38
3.11. Interfejs graficzny sekcji wyznaczania krzywej kalibracyjnej w opracowywanej aplikacji	39
 4.1. Schemat przedstawiający elementy układu optycznego, który został wykorzystany do badania grubości warstwy wody	41
4.2. Źródło światła wykorzystane w układzie - Thorlabs MINTF4	42

4.3. Charakterystyka przedstawiająca transmisję światła względem długości fal dla materiału N-BK7 [64]	42
4.4. Detektor układu optycznego - spektrometr OceanOptics HR4000 [66]	43
4.5. Platforma laboratoryjna Thorlabs L490MZ/M wykorzystana do badań grubości warstwy wody [67]	43
4.6. Rzeczywisty układ optyczny przy użyciu którego dokonywano badań	44
4.7. Aberracja chromatyczna podłużna występująca wskutek transmisji światła przez soczewkę skupiającą [44]	45
4.8. Wykres przedstawiający spektrum diody LED Thorlabs MINTF4 zastosowanej w układzie optycznym jako źródło światła [63]	45
4.9. Schemat przedstawiający wyznaczany zakres pomiarowy czujnika oraz odległość od soczewki w jakiej następuje zogniskowanie fal	46
4.10. Szczegółowy schemat przedstawiający metodę wyznaczania zakresu pomiarowego implementowanego czujnika dla warstwy wody; \varnothing lens - średnica soczewki, n_1 - współczynnik załamania światła dla powietrza, n_2 - współczynnik załamania światła dla wody, z_{air} - zakres pomiarowy dla powietrza, z_{water} - zakres pomiarowy dla wody, f_{500} - wartość ogniskowej dla fal o długości 500 nm, f_{650} - wartość ogniskowej dla fal o długości 650 nm	48
4.11. Wykres przedstawiający wyznaczoną teoretyczną krzywą kalibracyjną	50
4.12. Przedstawienie procedury przemieszczania powierzchni w celu weryfikacji poprawności wyznaczenia zakresu pomiarowego czujnika	51
4.13. Wykres przedstawiający zebrane pomiarowe służące do weryfikacji zakresu pomiarowego czujnika	51
4.14. Wykres przedstawiające dane na podstawie których została wyznaczona praktyczna i teoretyczna krzywa kalibracyjna	52
4.15. Koncepcyjny model naczynia służącego do uzyskania warstwy wody o konkretnej grubości	53
4.16. Utworzone naczynie do wytworzenia warstwy wody o zadanej grubości; ścianki zgodnie z numeracją zostały zmierzone mikroskopem konfokalnym	54
4.17. Wykres przedstawiające wyniki pomiarów mikroskopem konfokalnym każdej ze ścian naczynia; a) ściana 1, b) ściana 2, c) ściana 3, d) ściana 4 - zgodnie z oznaczeniem na rysunku 4.16	54
4.18. Wykres przedstawiający dane spektralne ze spektrometru, niepodane żadnemu przetwarzaniu	56
4.19. Wykres przedstawiający wartości spektralne przed i po przetwarzaniu filtrem średniej ruchomej o oknie 10 próbek	57
4.20. Wykres przedstawiający dane spektralne podzielone na dwa podzbiory; kolor niebieski - podzbiór nr 1, kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2	58
4.21. Wykres przedstawiający podzbiór w którym został ograniczony zakres długości fali w celu usunięcia nieistotnych próbek	59

4.22. Przykład przedstawiający działanie filtra Savitzkiego-Golaya; rząd wielomianu jest równy 2, a okno ma szerokość 7 próbek [70]	59
4.23. Wykres przedstawiający dane spektralne przed i po procesie wygładzania filtrem Savitzky-Golay; kolor niebieski - podzbiór nr 1 (przed filtracją), kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2 (przed filtracją), kolor żółty - podzbiór nr 1 (po filtracji), kolor fioletowy - podzbiór nr 2 (po filtracji)	60
4.24. Wykres przedstawiające dane spektralne po przetwarzaniu filtrem amplitudowym; kolor żółty - podzbiór nr 1 (po filtracji), kolor fioletowy - podzbiór nr 2 (po filtracji) .	60
4.25. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do danych rzeczywistych po wstępnym przetwarzaniu (model rozkładu Gaussa); kolor niebieski - podzbiór nr 1, kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2, kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2	62
4.26. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do wejściowych danych rzeczywistych (model rozkładu Gaussa); kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2, kolor zielony - wejściowe dane rzeczywiste	62
4.27. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do danych rzeczywistych po wstępnym przetwarzaniu (model rozkładu logarytmicznie-normalnego); kolor niebieski - podzbiór nr 1, kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2, kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2	63
4.28. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do wejściowych danych rzeczywistych (model rozkładu logarytmicznie-normalnego); kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2, kolor zielony - wejściowe dane rzeczywiste	63
4.29. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do danych rzeczywistych po wstępnym przetwarzaniu (model rozkładu Lorentza); kolor niebieski - podzbiór nr 1, kolor pomarańczowy - podzbiór nr 2, kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2	64
4.30. Wykres przedstawiający wyznaczone krzywe dopasowane do wejściowych danych rzeczywistych (model rozkładu Lorentza); kolor żółty - krzywa dopasowana do podzbioru nr 1, kolor fioletowy - krzywa dopasowana do podzbioru nr 2, kolor zielony - wejściowe dane rzeczywiste	64
4.31. Przedstawienie graficzne wyników grubości szkła na podstawie wykonanych pomiarów (filtr średniej ruchomej)	67
4.32. Przedstawienie graficzne wyników grubości szkła na podstawie wykonanych pomiarów (rozkład Gaussa)	67
4.33. Przedstawienie graficzne wyników grubości szkła na podstawie wykonanych pomiarów (rozkład logarytmiczno-normalny)	68
4.34. Przedstawienie graficzne wyników grubości na podstawie wykonanych pomiarów (rozkład Lorentza)	68

SPIS TABEL

2.1.	Tabela zawierająca parametry przykładowo wybranych opisanych rodzajów czujników	31
4.1.	Tabela przedstawiająca przesunięcia ognisk dla fal o badanych długościach [65] . . .	46
4.2.	Tabela zawierająca dane do wyznaczenia zakresu pomiarowego czujnika w wodzie [65, 68]	47
4.3.	Wyniki głębokości naczynia dla każdej ściany - zgodnie z oznaczeniem na rysunku 4.16	55
4.4.	Zestawienie wyników grubości szkła dla każdej metody wyznaczania długości fal odbiitych od górnej i dolnej powierzchni	66
4.5.	Porównanie czasów wykonywania algorytmów wyznaczania szkła długości fal do obliczenia grubości szkła	69