Politechnika Wrocławska
Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Katedra Inżynierii Biomedycznej

Laboratorium PODSTAWY BIOFOTONIKI

Ćwiczenie nr 6

Charakterystyka właściwości tłumiących światło wybranych materiałów z jakich wykonane są okulary ochronne

CEL ĆWICZENIA:

- *Wyznaczenie liniowego współczynnika absorpcji na podstawie bezpośrednich pomiarów mocy promieniowania oświetlającego i transmitowanego przez badane próbki*
- *Wyznaczenie gęstości optycznej badanych materiałów*
- *Zapoznanie się z normami opisującymi warunki bezpiecznej pracy z laserami*
- *Charakterystyka (spektralna) właściwości absorpcyjnych badanych materiałów*

1. WPROWADZENIE

Do jednych z podstawowych zagadnień biomedycyny laserowej należy określenie bezpiecznych warunków pracy z promieniowaniem laserowym, zarówno osób przeprowadzających różnego rodzaju zbiegi terapeutyczne z wykorzystaniem wysokoenergetycznych źródeł światła, jak również osób poddawanych tym zabiegom. Z praktycznego punktu widzenia najbardziej narażone na działanie światła laserowego są oczy i skóra (patrz Tab.1).

Tab. 1 Efekty ekspozycji na promieniowanie optyczne (za tab. D1 według normy PN-EN 60825-1:2010) [1]

<table>
<tr><th>ZAKRES WIDMOWY</th><th>OKO</th><th>SKÓRA</th></tr>
<tr><td>Nadfiolet C
(180–280 nm)</td><td rowspan="2">zapalne uszkodzenie rogówki</td><td rowspan="2">rumień i oparzenia przyspieszone starzenie skóry, zwiększona pigmentacja</td></tr>
<tr><td>Nadfiolet B
(280–315 nm)</td></tr>
<tr><td>Nadfiolet A
(315–400 nm)</td><td>katarakta fotochemiczna</td><td rowspan="2">ciemnienie pigmentu, reakcje fotouczuleniowe, oparzenie skóry</td></tr>
<tr><td>Widzialny
(400–780 nm)</td><td>fotochemiczne i termiczne uszkodzenie siatkówki</td></tr>
<tr><td>Podczerwień A
(780–1400 nm)</td><td>katarakta, oparzenie siatkówki</td><td rowspan="3">oparzenie skóry</td></tr>
<tr><td>Podczerwień B
(1400 nm–3 µm)</td><td>przymglenie rogówki, katarakta, oparzenie rogówki</td></tr>
<tr><td>Podczerwień C
(3 µm–1 mm)</td><td>oparzenie rogówki</td></tr>
</table>

Podczas, gdy w przypadku skóry bezpieczne warunki pracy możemy uzyskać dzięki zastosowaniu odzieży ochronnej, w przypadku oczu konieczne jest zastosowanie specjalnych okularów ochronnych, które osłabią lub też całkowicie pochłoną światło laserowe zanim dotrze ono do oczu. Wymaga to użycia selektywnych spektralnie materiałów wykazujących specyficzne właściwości transmisyjne/ absorpcyjne. Oko jest najbardziej wrażliwym narządem na szkodliwe skutki promieniowania laserowego. Struktury oka zawierają duże ilości barwników, które silnie pochłaniają promieniowanie z zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni. W zakresie długości fal od 400 do 1400 nm promieniowanie to wnika do wnętrza oka i jest ogniskowane na siatkówce, co może powodować jej uszkodzenie. Promieniowanie z zakresu długości fal powyżej 1400 nm i poniżej 400 nm nie wnika do wnętrza oka, lecz może doprowadzić do uszkodzenia rogówki.

Należy również pamiętać, że światło jest szeroko stosowane zarówno w różnego rodzaju zagadnieniach metrologicznych (pomiarowych), jak również w szeroko rozumianym obrazowaniu optycznym obejmującym m.in. mikroskopię optyczną, holografię optyczną, holografię cyfrową, endoskopię, widzenie maszynowe itp., w których istotnym zagadnieniem jest kontrola natężenia wiązki świetlnej. Dlatego też również w tych zagadnieniach, istotnym problemem jest odpowiedni dobór materiałów o specyficznych właściwościach absorpcyjnych, które mogą być wykorzystane jako filtry amplitudowe osłabiające wiązkę świetlną.

Powyższe przesłanki pokazują, jak istotnym zagadnieniem w optyce biomedycznej jest scharakteryzowanie właściwości absorpcyjnych różnego rodzaju obiektów. Poniżej przedstawione zostaną podstawy fizyczne absorpcji oraz ilościowej charakteryzacji właściwości absorpcyjnych badanych materiałów [2, 3].

W ogólnym przypadku światło rozchodzące się w ośrodku materialnym traci część niesionej przez siebie energii w wyniku oddziaływania z atomami znajdującymi się w tym ośrodku. W wyniku tego procesu amplituda fali świetlnej ulega wykładniczemu osłabieniu, które jest uzależnione od współczynnika absorpcji. W celu określenia strat energii świetlnej wywołanej rozchodzeniem się światła przez ośrodki o różnych współczynnikach załamania, których powierzchnie charakteryzują się różną geometrią oraz różnymi współczynnikami odbicia i transmisji, konieczne jest przeanalizowanie strat energii świetlnej uzależnionych od strat fresnelowskich na powierzchniach granicznych, łamiących, od współczynnika odbicia powierzchni odbiciowych oraz od przepuszczalności - transmitancji. Poniżej opisane zostaną zagadnienia omawiające podstawy fizyczne procesu absorpcji oraz ilościowej charakteryzacji tego zjawiska.

Zdolność różnych obiektów fizycznych do absorpcji promieniowania elektromagnetycznego zależy od wielu czynników, głównie od struktury atomowej danego ośrodka, grubości warstwy absorbującej, długości fali, temperatury czy stężenia. W różnych ośrodkach obserwuje się pewne charakterystyczne dla nich cechy absorpcji. Gazy jednoatomowe absorbują promieniowanie bardzo selektywnie, dla ściśle określonych długości fal. Przy absorpcji przez cząstki występują zazwyczaj pasma absorpcji, czyli zespoły wielu bliskich linii widmowych będące rezultatem wzajemnego nakładania się wzbudzeń stanów elektronowych, oscylacyjnych i rotacyjnych cząstek. W cieczach i ciałach stałych dyskretna struktura pasm absorpcyjnych najczęściej nie jest obserwowana.

Wielkości fizyczne, które opisują ilościowo zjawiska absorpcji i transmisji nazwano ***absorbancją*** (***osłabieniem***) i ***transmitancją*** (***pochłanianiem, współczynnikiem transmisji***)

Transmitancja *T* oznacza stosunek natężenia $I_{wyj.}$ wiązki promieniowania przepuszczonego przez próbkę do natężenia I_0 wiązki padającej:

$$T = \frac{I_{wyj.}}{I_0} \text{ lub } T_{[\%]} = \frac{I_{wyj.}}{I_0} \times 100 \qquad (1)$$

Wielkość ta będzie miała wartość maksymalną T=1 ($T_{[\%]}$=100%), gdy światło będzie przechodzić przez próbkę niepochłaniającą światła, podczas gdy osiągnie wartość minimalną T=0, gdy

światło zostanie całkowicie pochłonięte przez badaną próbkę. Transmitancja nie jest funkcją pozwalającą na określenie prostoliniowej zależności stężenia substancji pochłaniającej światło. Umożliwia to jednak inna wielkość opisująca pochłaniane światła - absorbancja.

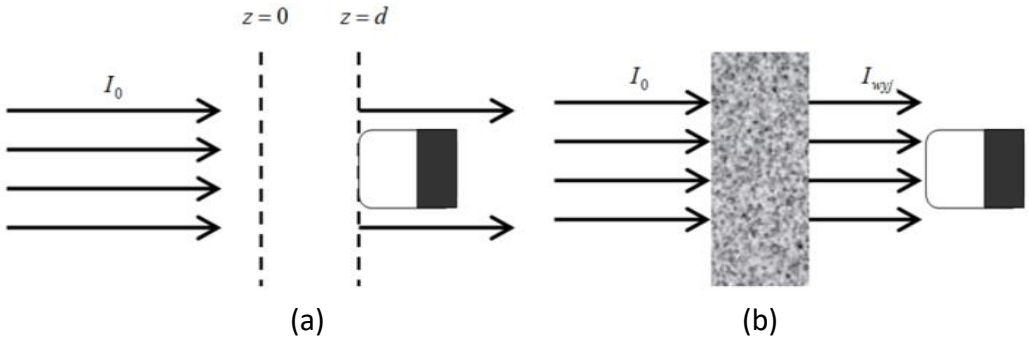
Absorbancja *A* to logarytm dziesiętny odwrotności transmitancji:

$$A = \log\frac{1}{T} = \log\frac{100}{T_{[\%]}} \qquad (2)$$

Wielkość tą, określającą w sposób ilościowy zjawisko absorpcji światła, często określa się również mianem ekstynkcji.

Jednym z podstawowych praw opisujących zjawisko absorpcji/ osłabienia promienia świetlnego w trakcie jego rozchodzenia się w absorbującym ośrodku materialnym jest **prawo Bouguera**.

Jeżeli przez dany obiekt np. płytkę płasko-równoległą (lub kuwetę) o grubości *d*, wykonaną z materiału o współczynniku absorpcji μ_a i pochłaniającą światło, przepuścimy wiązkę światła o natężeniu I_0, wówczas możliwy będzie pomiar natężenia światła I_{wyj} po przejściu przez ten obiekt za pomocą detektora (detektor promieniowania zlokalizowany bezpośrednio za płytką w odległości *z=d* (patrz Rys. 1).



Rys. 1 Schemat ilościowego pomiaru absorpcji światła: (a) pomiar koncepcyjny, (b) praktyczna realizacja (opis w treści) [3]

Prawdziwa zatem będzie zależność:

$$\ln\frac{I_{\text{wyj}}}{I_0} = -\mu_a \cdot d \qquad (3)$$

Równanie opisujące **prawo Lamberta-Beera** bezpośrednio wynika z zależności opisującej natężenie wiązki świetlnej, która przebyła drogę *d* w ośrodku o liniowym współczynniku absorpcji μ_a:

$$I_{\text{wyj}} = I_0 e^{-\mu_a d} \tag{4}$$

Parametr μ_a oznacza **liniowy współczynnik absorpcji** wyrażony w cm^{-1}. Opisuje on straty natężenia światła na jednostkowej drodze na skutek absorpcji. Współczynnik ten można również zdefiniować jako odwrotność grubości warstwy absorbującej, po przebyciu której natężenie światła zmaleje *e*-krotnie.

Na podstawie równania (4) widzimy, iż dzięki bezpośrednim pomiarom natężenia wiązki padającej na badany obiekt oraz natężenia wiązki przez niego przechodzącej, jak również jego grubości, możliwe jest wyznaczenie współczynnika μ_a charakteryzujących jego właściwości absorpcyjne.

Należy pamiętać jednak, że absorpcja promieniowania przez dane ciało ma charakter ściśle selektywny tzn. ma miejsce dla określonych długości fali promieniowania, co ma związek z warunkiem rezonansu, zatem współczynnik absorpcji charakteryzujący związki chemiczne jest wielkością dyspersyjną μ_a=f(λ).

Wielkość $1/\mu_a$ nazywa się średnią drogą swobodną δ_a przebytą przez foton przed aktem absorpcji i można dzięki niej wyznaczyć głębokość wnikania promieniowania świetlnego do ośrodka. Średnia droga swobodna przebyta przed aktem absorpcji jest to odległość przebyta przez foton w warstwie badanej substancji, po przejściu której natężenie światła zmniejszy się *e* razy. Dla przykładu w oknie optycznym 600–900 nm dla tkanek pozbawionych melaniny wynosi ona od 3 do 6 mm. W przypadku światła ultrafioletowego głębokość penetracji wynosi około 0,5 do 1,5 mm, a w zakresie zieleni i żółci około 1 do 3 mm.

Ponadto należy pamiętać, że na efektywność absorpcji światła najistotniejszy wpływ ma grubość poszczególnych warstw badanego ośrodka oraz występowanie w nim substancji absorbujących.

Do ochrony indywidualnej oczu przed promieniowaniem laserowym służą okulary, gogle i osłony twarzy zaopatrzone w specjalne amplitudowe filtry ochronne. Filtry powinny być zawsze dobrane do długości fali promieniowania lasera. Powinny dobrze tłumić promieniowania laserowe, natomiast przepuszczać promieniowanie z innych obszarów widma tak, aby nie ograniczać dobrego widzenia. Do określenia skuteczności ochrony przed promieniowaniem laserowym wyznacza się parametry:

- widmowy współczynnik przepuszczania ($\tau(\lambda)$),
- gęstość optyczna (D_λ),

- współczynnik przepuszczania światła (τ_v),
- odporność na promieniowanie laserowe.

Z punktu widzenia doboru odpowiednich filtrów amplitudowych oraz okularów ochronnych, szczególnie ważną wielkością je charakteryzująca jest gęstość optyczna.

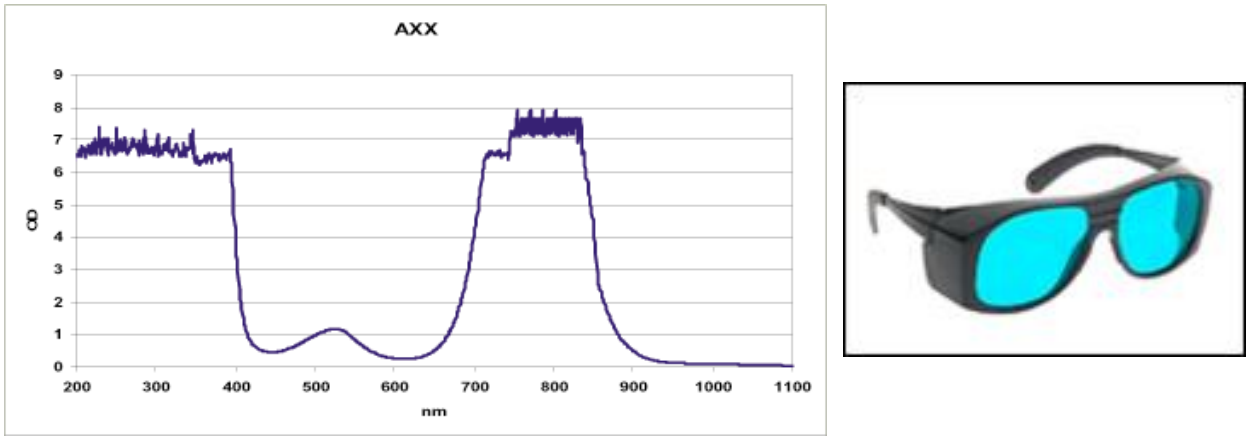
W przypadku okularów ochronnych, **minimalną wartość gęstości optycznej** (OD_λ) filtrów z jakich sa one wykonane, w warunkach założonej ekspozycji (H) na światło oblicza się ze wzoru:

$$OD_\lambda = \log_{10} \frac{H_0}{MDE} \tag{5}$$

gdzie: H_0 to spodziewany poziom ekspozycji niechronionego oka zdefiniowany przez natężenie napromienienia (gęstość mocy) lub też napromienienie (gęstość energii), MDE to maksymalna dopuszczalna ekspozycja zdefiniowana przez obowiązującą normę BHP PN-EN 60825-1:2010.
Zgodnie z powyższą normą Maksymalna Dopuszczalna Ekspozycja MDE określa maksymalny poziom napromieniowania, na który może być eksponowane oko lub skóra, bez powodowania obrażeń (zarówno natychmiastowych, jak i pojawiających się po dłuższym czasie). Wartość MDE zależy od długości fali promieniowania, czasu trwania ekspozycji, rodzaju tkanki, rozmiaru obrazu na siatkówce.
W przypadku specyficznych filtrów amplitudowych wykorzystywanych w obrazowaniu optycznym lub optycznych technikach pomiarowych, zależność wiążącą wartość współczynnika transmisji (transmitancji) *T* oraz gęstość optyczną OD można wyrazić w następujący sposób:

$$T = \frac{I_{wyj.}}{I_0} = 10^{-OD} \tag{6}$$

Zasadniczą informacją, która określa przydatność filtru do ochrony oczu przed promieniowaniem laserowym jest jego charakterystyka widmowa, obejmująca zakresy niebezpiecznego promieniowania laserowego oraz widzialnego. Na rysunku (Rys. 2) zaprezentowano przykładową charakterystykę widmową filtra AXX stosowanego dla lasera aleksandrytowego, zakres widmowy (720–830 nm), przepuszczalność światła widzialnego 33% [4].



Rys. 2 Charakterystyka widmowa filtra AXX oraz okulary ochronne [4]

2. UWAGI DO WYKONANIA POMIARÓW

W trakcie zajęć Studenci mają za zadanie:

A. *wyznaczyć liniowe współczynniki absorpcji wybranych przez Prowadzącego materiałów poprzez bezpośrednie pomiary natężenia promieniowania oświetlającego próbkę oraz pomiary natężenia wiązki po przejściu przez próbkę;*

B. *zmierzyć widma absorpcyjne wybranych przez Prowadzącego materiałów.*

Poniżej opisane zostaną układy pomiarowe, które zostaną wykorzystane w przeprowadzanych pomiarach, jak również uwagi dotyczące użytkowania aparatury pomiarowej.

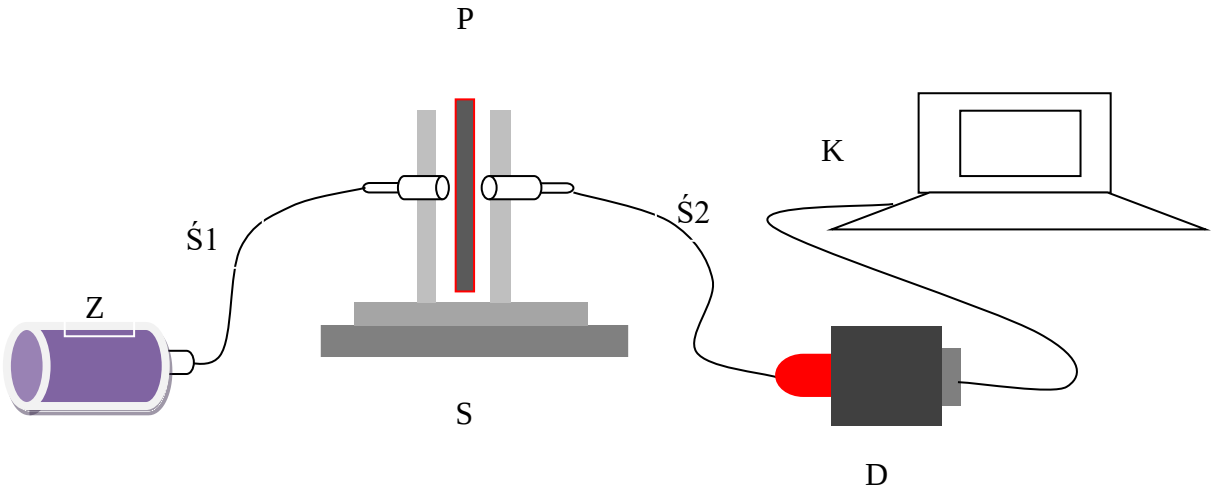
A. POMIAR LINIOWEGO WSPÓŁCZYNNIKA ABSORPCJI

W trakcie zajęć wykorzystywany będzie częściowo skonfigurowany układ pomiarowy, który składać się będzie z następujących elementów:

- lasera półprzewodnikowego (405 nm) z systemem stabilizującym (Z);
- statywu (S) wyposażonego w soczewki autokolimujące
- 2 światłowodów (Ś1,Ś2);
- cyfrowego miernika mocy USB PM100 wyposażonego w detektor krzemowy (fotodiody Si) rejestrującego promieniowanie w zakresie spektralnym 400 - 1100 nm (producent Thorlabs) (D);
- badanej próbki (P)
- Komputera (K).

Do pomiaru grubości filtrów wykorzystywany będzie mikrometr z śrubą mikrometryczną.

Schematy stosowanych układów pomiarowych zostały przedstawione na Rys. 3.



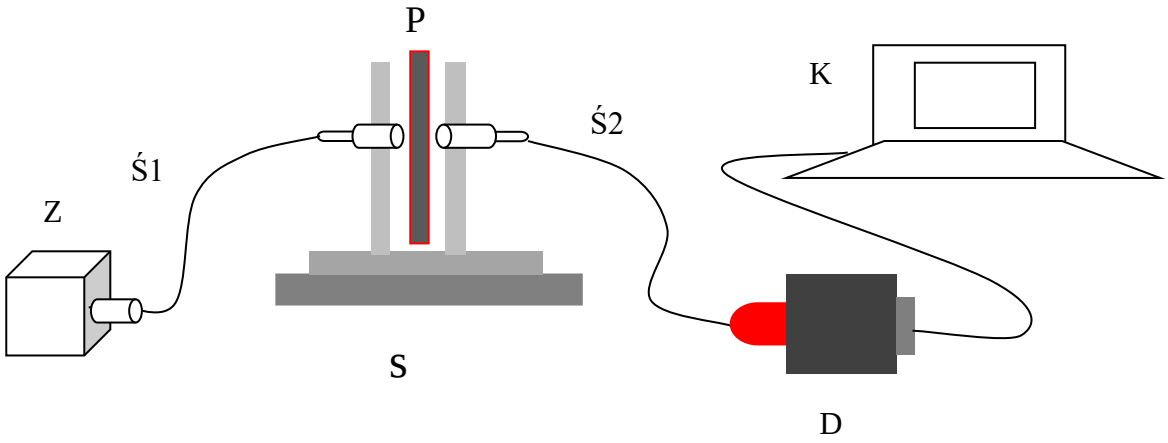
Rys. 3 Schemat układu pomiarowego

B. POMIAR WIDMA ABSORPCJI/TRANSMISJI BADANYCH MATERIAŁÓW

W tym celu wykorzystywany zostanie układ pomiarowy, który składać się będzie z następujących elementów:

- lampy halogenowo-deuterowej (Z)
- statywu (S) wyposażonego w soczewki autokolimujące
- 2 światłowodów (Ś1, Ś2)
- spektrofotometru światłowodowego AvaSpec-3648 (D)
- badanej próbki (P)
- komputera (K).

Schematy stosowanych układów pomiarowych zostały przedstawione na Rys. 4.



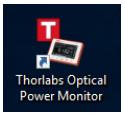
Rys. 4 Schemat układu pomiarowego

UWAGA: Włączenia lasera dokonuje Prowadzący!!!! Należy uważać, aby nie wkładać żadnych elementów odbijających w tor biegu wiązki laserowej. Należy chronić oczy przed bezpośrednim oświetleniem przez promieniowanie laserowe.

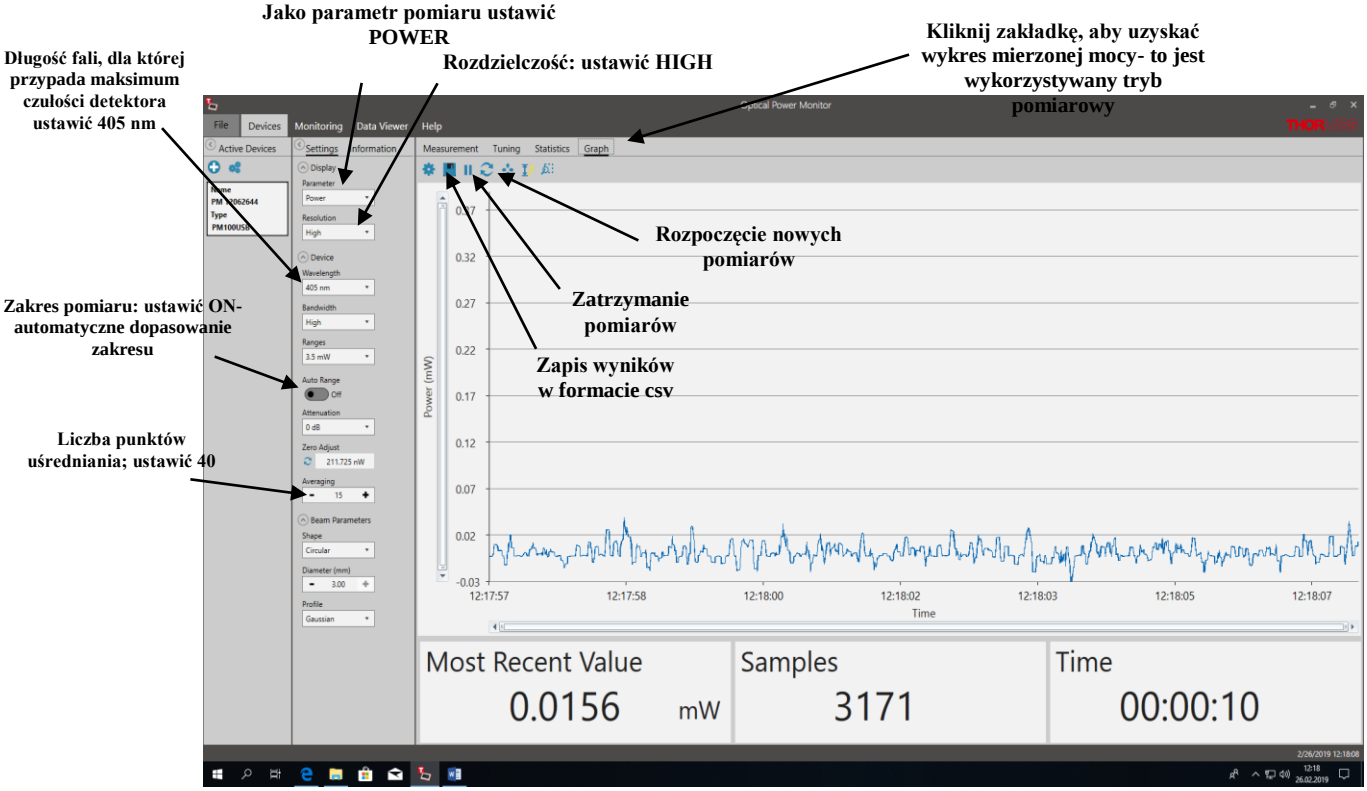
OBSŁUGA MIERNIKA MOCY PM100D

Do pomiarów mocy promieniowania świetlnego wykorzystany będzie kompaktowy miernik USB mocy PM100USB przedstawiony na Rys. 5, który jest bezpośrednio podłączony do komputera. Przy mierniku znajduje się fotodioda krzemowa, do której należy podłączyć światłowód doprowadzający światło transmitowane przez badaną próbkę. Czarna strzałka na Rys. 5 pokazuje wyście kabla transmisji danych z miernika do komputera za pomocą złącza USB 2.0.

Rys. 5 Miernik mocy PM100USB

Parametry pomiaru oraz wyniki pomiarów realizowane są za pomocą oprogramowania zainstalowanego na komputerze. W celu uruchomienia programu kontrolującego działanie miernika znajdź na pulpicie i kliknij następującą ikonę 

Po uruchomieniu programu, i kliknięciu zakładki Graph, na ekranie monitora pojawi się okno, które zostało przedstawione na Rys.5 wraz z objaśnieniem poszczególnych funkcji programu. Należy wprowadzić odpowiedni parametry detekcji określone na rysunku.



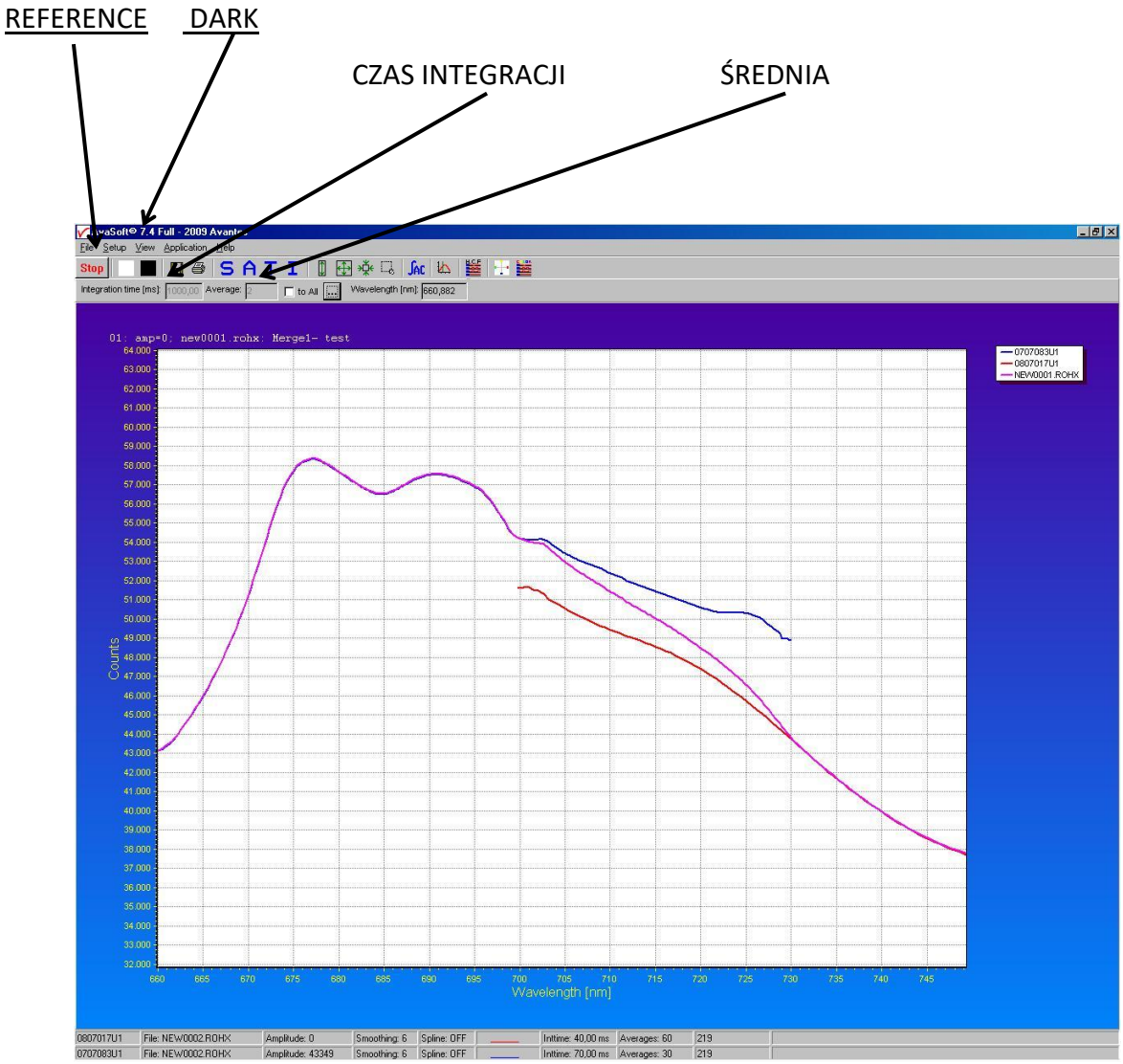
Rys.5 Okno programu kontrolującego pomiar mocy.

W trakcie zapisywania, pliki z pomiarami należy zapisać w folderze *Pomiary_ODM* w domyślnym folderze otwartym bezpośrednio przez program. PROSZĘ NIE ZMIENIAĆ SCIEŻKI DOSTĘPU ORAZ FOLDERU DOMYSLNEGO. Dostęp do tego folderu jest możliwy przez skrót na pulpicie:

UWAGA: Podłączenia miernika mocy oraz kontroli parametrów pomiaru dokonuje PROWADZĄCY !!!

OBSŁUGA PROGRAMU AVASOFT SPEKTROFOTOMETRU AVASPEC-3648

Na rysunku Rys. 6 przedstawiono zrzut ekranu głównego okna programu AvaSoft spektrofotometru AvaSpec-3648.



Rys. 6 Wygląd ekranu programu AvaSoft spektrofotometru AvaSpec-3648.

3. ZADANIA POMIAROWE I PRZEBIEG POMIARÓW

W trakcie ćwiczeń laboratoryjnych Studenci mają za zadanie zrealizować następujące pomiary:

A. ***wyznaczyć liniowe współczynniki absorpcji wybranych przez Prowadzącego materiałów poprzez bezpośrednie pomiary natężenia oświetlającego próbkę oraz natężenia wiązki po przejściu przez nią***

Przebieg pomiaru:

1) Układ pomiarowy jest skonfigurowany jak na Rys. 3.
2) Prowadzący podłącza miernik mocy, włącza źródło laserowe.
3) Studenci otrzymują od Prowadzącego próbki w postaci filtrów amplitudowych, których współczynnik absorpcji będzie musiał zastać wyznaczony.
4) Dosuń czołowo dwa ramiona statywu do siebie i dokonaj pomiaru mocy wiązki wejściowej P_0 za pomocą miernika mocy. Liczba pomiarów: 5. Zapisz uzyskane wyniki pomiarów.
5) Za pomocą mikrometru dokonaj 5 pomiarów grubości każdego filtra.
   UWAGA: Należy zachować szczególną ostrożność, aby nie zniszczyć, ułamać filtra.
6) Umieść badany filtr pomiędzy soczewkami autokolimacyjnymi znajdującymi się pomiędzy ramionami statywu, które doprowadzają wiązkę światła od filtra i odprowadzają wiązką przez niego transmitowaną/ tłumioną do detektora. Dosuń ramiona statywu do filtra.
7) Dokonaj pomiaru mocy wiązki transmitowanej przez filtr. Liczba pomiarów 5. Zapisz uzyskane wyniki pomiarów.
8) Czynności z punkt.5, 6 i 7 wykonaj dla wszystkich próbek płaskich filtrów amplitudowych dostarczonych przez Prowadzącego.
9) Czynności z punkt. 5,6,7 wykonaj również dla okularów ochronnych udostępnionych przez prowadzącego.

B. ***zmierzyć widma absorpcyjne wybranych przez Prowadzącego materiałów.***

Przebieg pomiaru:

1) Układ pomiarowy jest skonfigurowany jak na Rys. 4.
2) Światłowód doprowadzający światło do badanej próbki, zamiast do lasera jest teraz podłączony do lampy halogenowo-deturowej, w celu wyznaczenia charakterystyki spektralnej badanych filtrów.
3) Światłowód odprowadzający światło transmitowane przez badaną próbkę należy podłączyć do spektrofotometru AvaSpec-3648.
4) Dokonaj pomiarów absorbancji i transmitancji wszystkich badanych w części A filtrów oraz okularów ochronnych. Jako odniesienie wykorzystaj szkiełko mikroskopowe dostarczone przez prowadzącego. Pomiarów dokonaj według następującego schematu:

   <u>Pomiary absorpcji / transmisji</u>

   a) Włącz źródło światła i sprawdź czy promieniowanie pada na badaną próbkę
   b) **<u>WYŁĄCZ</u>** źródło światła.
   c) Ustal czas integracji (*Integration time*)1000 ms i średnią liczbę zliczeń detektora (*Average*) 10 lub według wytycznych Prowdzącego. Widmo powinno być gładkie, niezaszumione.
   d) Wciśnij przycisk **START** na pasku narzędzi
   e) Wciśnij przycisk **DARK** (czarny kwadrat na pasku narzędzi).
      (ŹRÓDŁO ŚWIATŁA WYŁĄCZONE!!!!)
   f) Z menu wybierz **Setup -> Substract Dark Spectrum**.
   g) **WŁĄCZ** źródło światła,
   h) Wciśnij przycisk **REFERENCE** (biały kwadrat na pasku narzędzi).
   i) Wybierz na pasku narzędzi odpowiedni tryb pomiaru (litera A – absorbancja, litera T- transmisja).
   j) <u>Zapisywanie danych</u>

- Z menu wybierz File -> Save Experiment
- Z menu wybierz File -> Convert graph to excel.
- Wybierz folder z danymi Studenci.
- Zapisz plik pod sobie znaną nazwą i skopuj na pendrive.

4 OPRACOWANIE WYNIKÓW

CZĘŚĆ A

- Z 5 pomiarów *d* grubości próbki wyznacza wartość średnią $\bar{d}$ oraz odchylenie od wartości średniej Δd dla każdego z badanych filtrów/okularów ochronnych
- Z 5 pomiarów mocy promieniowania wejściowego wyznacz wartość średnią mocy $\overline{P_o}$ oraz odchylenie standardowe od wartości średniej $\Delta\overline{P_o}$.
- Z 5 pomiarów mocy promieniowania transmitowanego przez badaną próbkę wyznacz wartość średnią $\overline{P_d}$ oraz odchylenie standardowe od wartości średniej $\Delta\overline{P_d}$ dla każdej z badanych próbek
- Korzystając prawa Lamberta-Beera w następującej postaci:

$$\overline{P_d} = \overline{P_o} e^{-\bar{d}\mu}$$

  Wyznacz wartość linowego współczynnika absorpcji na podstawie zmierzonych wartości. Niepewność wyznaczenia tego współczynnika wyznacz metodą różniczki zupełnej.
- Na podstawie wartości średnich mocy wiązki wejściowej oraz wyjściowej wyznacz procentowy współczynnik transmisji (transmitancję) badanych próbek oraz niepewność jego wyznaczenia.
- Wyznacz gęstość optyczną przebadanych filtrów oraz niepewność ich pomiaru.
- Na podstawie załączonej tabeli norm BHP określ minimalną gęstość optyczną filtrów zabezpieczających rogówkę oraz siatkówkę przed uszkodzeniem przyjmując, że średnica źrenicy oka wynosi 6 mm, a czas ekspozycji 20 µs? (UWAGA: C_6=1)
- Określ czy przebadane filtry/okulary ochronne zapewniają bezpieczeństwo w pracy z użytym laserem.

CZĘŚĆ B

- Przedstaw graficznie wykresy zależności spektralnej wartości absorbancji oraz transmitancji badanych próbek.
- Określ w jaki sposób każda z próbek absorbuje światło. Scharakteryzuj różnice pomiędzy nimi.

4. LITERATURA

[1] Polska Norma PN-EN 60825-1 lipiec 2010: Bezpieczeństwo urządzeń laserowych, Część 1: Klasyfikacja sprzętu i wymagania, Warszawa 2010.

[2] Iwona Hołowacz, Halina Podbielska, rozdz.5.4 „Bezpieczeństwo pracy z laserami", str. 147-152 w „*Optyka biomedyczna. Wybrane zagadnienia*", Oficyna Wydawnicza PWR, 2011, Wrocław.

[3] Igor Buzalewicz, Halina Podbielska, rozdz.3 „*Podstawy fotofizyki*", str. 77-82 w „*Optyka biomedyczna. Wybrane zagadnienia*", Oficyna Wydawnicza PWR, 2011, Wrocław.

[4] http://amecam.pl/produkty/axx-k-184.html

Opracowanie: dr inż. Igor Buzalewicz
Katedra Inżynierii Biomedycznej Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej