

Wydział PPT	Instytut Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej
Ćwiczenie nr 3	Laboratorium PODSTAWY BIOFOTONIKI <i>Elementy fotometrii: pomiary natężenia napromienia wybranych źródeł światła</i>

CEL ĆWICZENIA:

- *Zapoznanie się z podstawowymi pojęciami fotometrycznymi*
- *Charakterystyka zmian natężenia napromienienia wybranych źródeł światła wraz ze zmianą odległości pomiaru*

1. WPROWADZENIE

Fala elektromagnetyczna rozchodząc się w przestrzeni staje się źródłem energii, która może prowadzić do podniesienia temperatury danego przedmiotu, wzbudzić jego luminescencję lub też jest w stanie zainicjować przebieg różnego rodzaju reakcji chemicznych, określanych mianem fotochemicznych. W zależności od ilości dostarczonej energii świetlnej możemy uzyskać różnego rodzaju efekty, dlatego też określenie natężenia światła jest tak istotne w optyce biomedycznej. Zastosowanie światła zarówno w medycynie, biologii, jak również w różnego rodzaju problematyce metrologicznej, wymaga dokładnego określenia charakterystyk promieniowania świetlnego poczynając od jego długości fali, mocy promieniowania, luminacji, światłości źródła światła itp, oraz warunków oświetlania obiektów, na które pada światło opisanych np. przez natężenie napromienienia, napromienienie (gęstość energii) itp.

Porównywaniem oraz pomiarem energii światła białego zajmuje się fotometria, z kolei porównywaniem i pomiarem energii poszczególnych składowych długości fali analizowanego światła, czyli składowych spektralnych, zajmuje się spektrofotometria. Detekcja promieniowania elektromagnetycznego, w tym światła, opiera się na pomiarze energii tego promieniowania, dlatego też poniżej opisane zostaną podstawowe wielkości fizyczne pozwalające na scharakteryzowanie energii niesionej przez falę elektromagnetyczną, jak również wielkości powszechnie stosowane w fotometrii.

W przypadku, gdy chcemy analizować „ilość” światła oświetlającego daną powierzchnię, posługujemy się wielkością fizyczną określaną mianem natężenia promieniowania I , która zdefiniowana jest jako uśredniona energia promieniowania padającego na jednostkową

powierzchnię w jednostkowym czasie. Każdy detektor promieniowania charakteryzuje się skończonymi wymiarami powierzchni sensorycznej, zatem oświetlona powierzchnia detektora zawsze ogranicza się do pewnego ustalonego obszaru. Z tego też powodu, w celu wyeliminowania zależności uzyskiwanych wyników pomiaru natężenia promieniowania od rozmiaru okna detektora, wartość całkowitej energii promieniowania dzieli się przez wartość powierzchni detektora. Jednocześnie pomiary wykonywane są w skończonym okresie czasu t , tym samym wyniki pomiarów przeprowadzonych w tych samych warunkach, lecz w innym okresie czasu, mogą się w znaczny sposób różnić. W celu wyeliminowania tego wpływu, czyli normalizacji uzyskiwanych wyników pomiarów, zmierzona wartość również dzieli się również przez czas t . W ten sposób średnia wartość energii elektromagnetycznej podzielona przez powierzchnię detektora oraz czas pomiaru, określa wartość natężenia promieniowania.

Jak już wspomniano, pomiarem charakterystyki energetycznej światła białego emitowanego przez źródła światła lub też padającego na dane obiekty, zajmuje się fotometria. W celu bezpośredniego określenia oraz porównania efektywności działania źródeł świetlnych lub też oświetlenia powierzchni, w fotometrii stosuje się pewne podstawowe wielkości fizyczne, które zostaną przedstawione poniżej.

Na początku wprowadźmy pojęcie kąta bryłowego Ω , którego jednostką jest steradian (sr). Steradian jest to kąt bryłowy o wierzchołku w środku kuli wycinający z jej powierzchni pole równe kwadratowi promienia tej kuli. Wartość kąta bryłowego wyrażonego w steradianach określa stosunek pola P wyciętego przez ten kąt na powierzchni kuli o promieniu r do kwadratu tego promienia:

$$\Omega = \frac{P}{r^2} [\text{sr}]. \quad (1)$$

Pełny kąt bryłowy jest równy 4π sr. Jedną z podstawowych wielkości fotometrycznych opisującą ilość energii $d\Sigma$ wypromieniowaną w jednostce czasu dt przez źródło światła jest **strumień energii** ϕ_o zdefiniowany w następujący sposób:

$$\phi_o = \frac{d\Sigma}{dt}. \quad (2)$$

Jednostką strumienia energii świetlnej jest wat (W). Strumień ten będziemy określać mianem obiektywnego strumienia energii, gdyż dotyczy on detektorów rejestrujących światło polichromatyczne - białe, z taką samą czułością dla wszystkich jego składowych.

Natężenie promieniowania źródła światła (światłość) I_{zr} jest to strumień promieniowania emitowany ze źródła światła w jednostkowym kącie bryłowym. Podobnie, jak w przypadku

strumienia energii, w zależności od sposobu pomiaru, wyróżniamy obiektywne natężenie promieniowania źródła światła:

$$I_{zr}^o = \frac{\phi_o}{\Omega}, \quad (3)$$

którego jednostką jest wat przez steradian (W/sr).

Kolejną wielkością fotometryczną charakteryzującą źródło światła jest **luminancja** L (**jaskrawość**), którą definiuje się jako strumień promieniowania emitowanego przez jednostkę powierzchni źródła w jednostkowym kącie bryłowym. Podobnie, jak poprzednio, wyróżniamy **luminancję obiektywną**:

$$L_o = \frac{I_{zr}^o}{P} = \frac{\phi_o}{\Omega \cdot P} \left[\frac{W}{sr \cdot m^2} \right], \quad (4)$$

Jednostką luminancji subiektywnej jest nit. Źródło światła ma luminancję równą 1 nitowi, jeżeli 1 m² powierzchni źródła emituje promieniowanie o światłości 1 kandeli w kierunku normalnym do powierzchni.

W celu charakteryzacji warunków oświetlenia powierzchni wprowadzono wielkość fizyczną określaną jako oświetlenie i zdefiniowaną przez strumień światła normalnie padającego na jednostkę powierzchni. W przypadku fotometrii obiektywnej wielkość tę nazywamy **natężeniem napromienienia** (także gęstością mocy lub gęstością strumienia energii) i wyrażamy poprzez następującą zależność:

$$E = \frac{\phi_e}{P} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5)$$

Natężenie napromienienia jest wielkością szczególnie ważną, iż w biomedycynie laserowej jest wykorzystywane do określenia warunków oświetlenia różnego rodzaju tkanek w celu uzyskania odpowiednich efektów terapeutycznych (termicznych, fotochemicznych itp.)

Dodatkowo w przypadku fotometrii obiektywnej definiuje się kolejną wielkość fizyczną nazywaną **gęstością energii promieniowania (napromienienie)**, określającą energię Σ emitowaną przez/lub padającą na jednostkę powierzchni:

$$GE = \frac{\Sigma}{S} \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (6)$$

Zestawienie podstawowych wielkości fizycznych fotometrii obiektywnej oraz subiektywnej, jak również ich jednostek, zostało przedstawione w Tab. 1.

Tab. 1 Wykaz podstawowych wielkości fotometrycznych oraz ich jednostek

Fotometria obiektywna		
	wielkość fizyczna	jednostka
1	energia promienista – emitowana lub padająca na powierzchnię	[J]
2	obiektywny strumień energii (moc promienista)	[W]
3	natężenie promieniowania źródła światła (światłość)	[W/sr]
4	luminancja promieniowania (jaskrawość)	[W/sr·m ²]
5	natężenie napromienienia (gęstość mocy, gęstość strumienia energii, oświetlenie)	[W/m ²]
6	gęstość energii promieniowania	[J/m ²]

Podstawową relacją przedstawiającą związki pomiędzy wielkościami fotometrycznymi jest prawo odwrotnych kwadratów, które wyraża zasadę zachowania energii wyemitowanej przez punktowe źródło światła. Rozpatrzmy zatem przypadek punktowego źródła światła, równomiernie emitującego energię we wszystkich możliwych kierunkach. Dodatkowo założmy, że przestrzeń wokół źródła światła została ograniczona przez dwie powierzchnie sferyczne o promieniach krzywizny równych odpowiednio r_1 oraz r_2 (patrz Rys. 1).

Przyjmijmy również, że wyrażenia $A_0(r_1), A_0(r_2)$ reprezentują amplitudy fal świetlnych w odległości odpowiednio r_1 oraz r_2 od źródła światła. Zgodnie z zasadą zachowania energii, całkowita energia przechodząca w jednostce czasu przez kolejne powierzchnie ograniczające oddalone o r_1 oraz r_2 od źródła punktowego musi być taka sama. Oczywiście przy założeniu, iż w przestrzeni tej nie ma innych źródeł światła i nie zachodzi zjawisko absorpcji. W dalszych rozważaniach należy pamiętać, iż natężenie jest równe średniej energii padającej na jednostkę powierzchni w jednostce czasu. Jeżeli zauważymy, że natężenie promieniowania jest proporcjonalne do kwadratu rzeczywistej amplitudy fali świetlnej i wielkość tę pomnożymy przez pole oświetlonej powierzchni oraz wyciągniemy pierwiastek tego wyrażenia, wówczas otrzymamy następującą zależność:

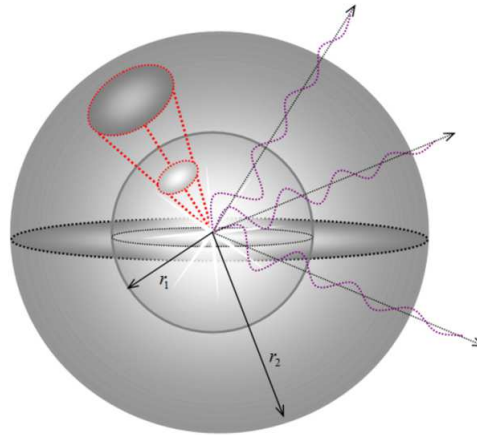
$$r_1 A_0(r_1) = r_2 A_0(r_2) \quad (7)$$

Ponieważ wartości r_i mogą przybierać dowolne wartości, oznacza to, iż

$$r A_0(r) = const, \quad (8)$$

czyli amplituda fali musi się zmniejszać proporcjonalnie do odwrotności odległości r_i powierzchni ograniczającej od źródła światła. Stwierdzenie to jest w pełni uzasadnione,

jeśli zauważymy, iż punktowe źródło światła generuje falę sferyczną, której amplituda jest równa A/r .



Rys. 1 Emisja promieniowania przez punktowe źródło światła (wyjaśnienie w tekście)

Tym samym, natężenie promieniowania emitowanego przez punktowe źródło światła jest proporcjonalne do $1/r^2$. Przedstawione twierdzenie nazywamy **prawem odwrotnych kwadratów**. Rozszerzając te rozważania na źródła rzeczywiste, rozciągłe a nie punktowe, możemy stwierdzić, iż natężenie napromieniania będzie malało wraz ze wzrostem odległości od źródła światła.

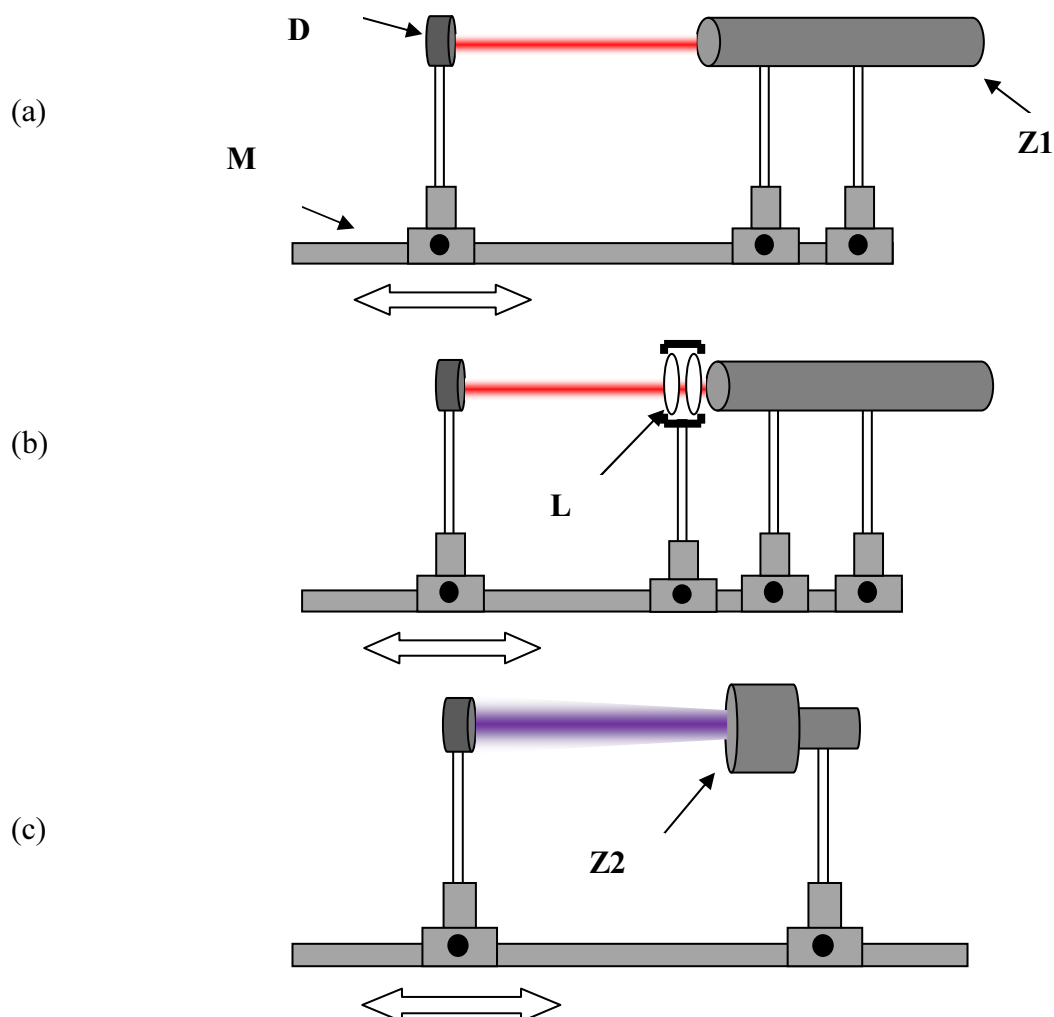
Jak wiadomo wszelkiego rodzaju oddziaływanie światła z tkanką wymaga zaabsorbowania przez nią określonej „ilości” energii świetlnej. Oznacza to, iż w światłolecznictwie, lub też ogólnie w optycznych metodach diagnostycznych lub terapeutycznych w celu uzyskania odpowiedniego rodzaju oddziaływania światła z tkanką konieczne jest uwzględnienie odległości badanej tkanki od źródła światła, gdyż warunkuje ona wartość natężenia napromienienia, a w konsekwencji dawkę dostarczonej energii świetlnej.

2. PRZEBIEG ĆWICZENIA ORAZ UWAGI DO WYKONANIA POMIARÓW

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

- lasera He-Ne (632,8 nm) z systemem stabilizującym (Z1);
- łąwy optycznej ze skalą milimetrową wraz z konikami i elementami mocującymi (M);
- dubletu achromatycznego $f=15$ mm (L);
- detektora krzemowego (fotodioda Si) S120C rejestrującego promieniowanie w zakresie spektralnym 400 -1100 nm (producent Thorlabs) (D).
- Cyfrowego miernika mocy PM100D (producent Thorlabs)
- oświetlacza LED wraz z systemem zasilającym (Z2).

Schematy stosowanych układów pomiarowych zostały przedstawione na Rys. 2.



Rys. 2 Schematy układów pomiarowych

W trakcie zajęć Studenci mają za zadanie:

- *zmierzyć zmiany natężenia napromienienia na powierzchni światłoczułej detektora oświetlonej przez wiązkę świetlną wygenerowaną przez laser HeNe w funkcji odległości detektora od analizowanego źródła światła (patrz Rys. 2a)*
- *zmierzyć zmiany natężenia napromieniania na powierzchni światłoczułej detektora oświetlonej przez wiązkę świetlną wygenerowaną przez laser HeNe po przejściu przez dublet achromatyczny (patrz Rys. 2b)*
- *zmierzyć zmiany natężenia napromienienia na powierzchni światłoczułej detektora oświetlonej przez wiązkę świetlną wygenerowaną przez oświetlacz LED (patrz Rys. 2c)*

OBSŁUGA LASERA HeNe

Przed przystąpieniem do pomiarów należy się zapoznać z uwagami Prowadzącego odnośnie bezpieczeństwa pracy z źródłem laserowym.

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

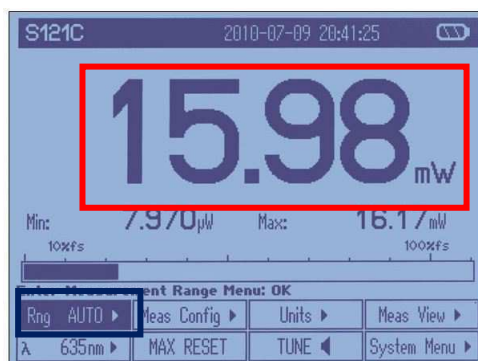
OBSŁUGA MIERNIKA MOCY PM100D

Do pomiarów mocy promieniowania świetlnego wykorzystany będzie miernik mocy PM100D przedstawiony na Rys. 3. Czarna strzałka na Rys. 3a oznacza lokalizację przycisku przeznaczonego do włączenia miernika. W trakcie zajęć Studenci będą odczytywać wyniki pomiarów bezpośrednio z wyświetlacza miernika przedstawionego na Rys. 3b. Wynik pomiaru został zaznaczony na tym rysunku czerwonym kwadratem.

UWAGA: W trakcie pomiarów należy zwrócić uwagę, aby miernik pracował w trybie automatycznego doboru zakresu mocy!!! Zmian ustawień pomiarowych miernika mocy może dokonywać jedynie Prowadzący!!!



(b)



(b)

Rys. 3 Miernik mocy PM100D: (a) zdjęcie miernika, (b) wyświetlacz miernika

Miernik mocy PM100D jest połączony z detektorem krzemowym dokonującym bezpośrednich pomiarów mocy promieniowania świetlnego. Został on przedstawiony na Rys. 4. Średnica powierzchni światłoczułej detektora wynosi 9,5 mm.



Rys. 4 Detektor mocy promieniowania świetlnego S120C

OBSŁUGA OŚWIETLACZA LED

Wykorzystywany w trakcie pomiarów oświetlacz LED został przedstawiony na Rys. 5a. Kontrolę natężenia generowanego promieniowania umożliwia zasilacz (patrz Rys. 5b) z płynną regulacją natężenia prądu. Regulację natężenia umożliwia widoczne na zdjęciu pokrętko. Należy zwrócić uwagę, aby w trakcie pomiarów nie zmieniać położenia pokrętki tak, aby możliwe było przeprowadzenie pomiarów dla oświetlacza generującego promieniowanie o stałym natężeniu. Wartość natężenia prądu zasilającego oświetlacz LED ustala jednorazowo Prowadzący na początku pomiarów.

UWAGA: Oświetlacz LED jest podłączany oraz wstawiany do układu pomiarowego przez Prowadzącego !!!



Rys. 5 Oświetlacz LED

3. ZADANIA POMIAROWE

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

A. *Pomiar zmian natężenia napromienienia na powierzchni światłoczułej detektora oświetlonej przez wiązkę świetlną wygenerowaną przez laser HeNe w funkcji odległości detektora od analizowanego źródła światła*

Przebieg pomiaru:

- 1) Układ pomiarowy jest skonfigurowany jak na Rys. 2a.
- 2) Prowadzący włącza laser HeNe
- 3) Umieść detektor bezpośrednio przed źródłem światła i oddalaj go, przesuując go na ławie optycznej, aż do końca ławy optycznej. Zaobserwuj jakie są zmiany wartości mocy promieniowania rejestrowane przez detektor.
- 4) Wybierz 5 odległości, w których zaobserwowano znaczące zmiany wartości mocy promieniowania rejestrowanego przez detektor.
- 5) Dla każdego położenia detektora dokonaj 6 pomiarów mocy promieniowania generowanego przez źródło światła.

Pojedynczy pomiar każdorazowo ma polegać na ustawieniu detektora w konkretnej odległości od źródła światła, odczytania wartości mocy z miernika, przesunięciu detektora oraz ponownego ustawienia w poprzednim położeniu i znowu dokonania pomiaru. Dla każdej odległości należy powtórzyć ten etap sześciokrotnie.

Pierwszy pomiar wykonaj bezpośrednio przed źródłem światła, a ostatni na końcu ławy optycznej.

- 6) Dodatkowo, wybierz arbitralnie 3 dodatkowe położenia detektora (inne niż poprzednio) i dokonaj pomiaru mocy promieniowania zgodnie z omówioną powyżej procedurą pomiaru.

UWAGA: Zwróć uwagę, aby plamka laserowa znajdowała się w obszarze światłoczułym detektora!!!!

B. Pomiar zmian natężenia napromieniania na powierzchni światłoczułej detektora oświetlonej przez wiązkę świetlną wygenerowaną przez laser HeNe po przejściu przez dublet achromatyczny

Przebieg pomiaru:

- 1) Układ pomiarowy jest skonfigurowany jak na Rys. 2b.
- 2) Prowadzący umieszcza w statywie dublet i włącza laser HeNe.
- 3) Umieść detektor bezpośrednio przed dubletem i oddalaj go, przesuując go na ławie optycznej, aż do końca ławy optycznej. Zaobserwuj jakie są zmiany wartości mocy promieniowania rejestrowane przez detektor.
- 4) Wybierz 5 odległości, w których zaobserwowano znaczące zmiany wartości mocy promieniowania rejestrowanego przez detektor.
- 5) Dla każdego położenia detektora dokonaj 6 pomiarów mocy promieniowania generowanego przez źródło światła.

Pojedynczy pomiar każdorazowo ma polegać na ustawieniu detektora w konkretnej odległości od dubletu, odczytania wartości mocy z miernika, przesunięciu detektora oraz ponownego ustawienia w poprzednim położeniu i znowu dokonania pomiaru. Dla każdej odległości należy powtórzyć ten etap sześciokrotnie.

Pierwszy pomiar wykonaj bezpośrednio przed dubletem, a ostatni na końcu ławy optycznej.

- 6) Dodatkowo, wybierz arbitralnie 3 dodatkowe położenia detektora (inne niż poprzednio) i dokonaj pomiaru mocy promieniowania zgodnie z omówioną powyżej procedurą pomiaru.

UWAGA: Zwróć uwagę, aby plamka laserowa znajdowała się lub obejmowała obszar światłoczuły detektora!!!!

C. Pomiar zmian natężenia napromienienia na powierzchni światłoczułej detektora oświetlonej przez wiązkę świetlną wygenerowaną przez oświetlacz LED

Przebieg pomiaru:

- 1) Układ pomiarowy jest skonfigurowany jak na Rys. 2c.
- 2) Prowadzący umieszcze w statywie oświetlacz LED i włącza go.
- 3) Umieść detektor bezpośrednio przed oświetlaczem LED i oddalaj go, przesuając go na ławie optycznej, aż do końca ławy optycznej. Zaobserwuj jakie są zmiany wartości mocy promieniowania rejestrowane przez detektor.
- 4) Wybierz 5 odległości, w których zaobserwowano znaczące zmiany wartości mocy promieniowania rejestrowanego przez detektor.
- 5) Dla każdego położenia detektora dokonaj 6 pomiarów mocy promieniowania generowanego przez źródło światła.

Pojedynczy pomiar każdorazowo ma polegać na ustawieniu detektora w konkretnej odległości od źródła światła, odczytania wartości mocy z miernika, przesunięciu detektora oraz ponownego ustawienia w poprzednim położeniu i znowu dokonania pomiaru. Dla każdej odległości należy powtórzyć ten etap sześciokrotnie.

Pierwszy pomiar wykonaj bezpośrednio przed źródłem światła, a ostatni na końcu ławy optycznej.

UWAGA: Zwróć uwagę, aby wiązka światła obejmowała obszar światłoczuły detektora!!!

4 OPRACOWANIE WYNIKÓW

Schemat opracowania wyników analizy mocy promieniowania lasera HeNe dla różnych odległości położenia detektora bez/z dubletem jest analogiczny dla każdego zadania pomiarowego (zad. pomiarowe A i B):

- Na podstawie 6 pomiarów mocy promieniowa P_i dla każdego położenia detektora wyznacz wartość średnią mocy promieniowania \overline{P}_i oraz odchylenie standardowe od wartości średniej $\Delta\overline{P}_i$ zgodnie z poniższymi wzorami:

$$\overline{P}_i = \frac{\sum_{n=6}^{i-1} P_i}{n}$$

oraz

$$\Delta\overline{P}_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=6}^{i-1} (P_i - \overline{P}_i)^2}{n}}$$

odpowiednio dla pięciu początkowo wybranych położen detektora

- Wiedząc, że średnica d obszaru światłoczułego detektora jest równa 9,5 mm, wyznacza natężenie napromienia na powierzchni detektora w jednostkach mW/cm^2
- Wyznacz niepewność wyznaczenia natężenia napromienia zakładając, że Δd wynosi 0.1 mm metodą różniczki zupełnej.
- Umieść w tabeli zarówno zmierzone wartości mocy promieniowania, jej średniej wartości, odchylenia standardowego od wartości średniej oraz natężenia napromienienia i niepewności jego wyznaczenia dla każdego położenia detektora
- W programie EXCEL sporządź wykres zależności wartości średniej mocy promieniowania od położenia detektora dla pięciu odległości wybranych

zgodnie z punkt. 4 przebiegu pomiarów. Na wykresie nanieś odchylenia standardowe oraz wyznacz najlepiej dopasowaną linię trendu.

- Korzystając z metody graficznej lub równania linii trendu na podstawie wykresu wyznacz wartość mocy promieniowania dla 3 wybranych położzeń detektora zmierzonych podczas pomiarów zgodnie z pkt. 6 opisu przebiegu pomiaru. Sprawdź, czy uzyskane wyniki odpowiadają wartościom średnim z samodzielnie przeprowadzonych, bezpośrednich pomiarów mocy promieniowania.

Dla oświetlacza LED (zad. pomiarowe C) opracowanie wyników przebiega w następujący sposób:

- Na podstawie 6 pomiarów mocy promieniowania P_i dla każdego położenia detektora wyznacz wartość średnią mocy promieniowania \overline{P}_i oraz odchylenie standardowe od wartości średniej $\Delta\overline{P}_i$ zgodnie z poniższymi wzorami:

$$\overline{P}_i = \frac{\sum_{n=6}^{i=1} P_i}{n}$$

oraz

$$\Delta\overline{P}_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=6}^{i=1} (P_i - \overline{P}_i)^2}{n}}$$

odpowiednio dla pięciu początkowo wybranych położzeń detektora

- Wiedząc, że średnica d obszaru światłoczułego detektora jest równa 9,5 mm, wyznacza natężenie napromienia na powierzchni detektora w jednostkach mW/cm^2
- Wyznacz niepewność wyznaczenia natężenia napromienia zakładając, że Δd wynosi 0.1 mm metodą różniczki zupełnej.
- Umieść w tabeli zarówno zmierzone wartości mocy promieniowania, jej średniej wartości, odchylenia standardowego od wartości średniej oraz natężenia napromienia i niepewności jego wyznaczenia dla każdego położenia detektora
- W programie EXCEL sporządź wykres zależności wartości średniej mocy promieniowania od położenia detektora dla pięciu odległości wybranych

zgodnie z punkt. 4 przebiegu pomiarów. Na wykresie nanieś odchylenia standardowe oraz wyznacz najlepiej dopasowaną linię trendu.

Wnioski powinny zawierać analizę oraz porównanie uzyskanych wyników pomiarowych w kontekście zmian wartości natężenia napromienienia źródła laserowego w obecności i bez obiektu oraz zmian natężenia napromienienia dla oświetlacza LED w zależności od położenia detektora, które wpłyną będą na oddziaływanie światła z materią żywą i nieżywą. Należy wyjaśnić, z czego wynikają zaobserwowane różnice.

4. LITERATURA

Igor Buzalewicz, Halina Podbielska, rozdz.3 „*Podstawy fotofizyki*”, str. 41-48 w „*Optyka biomedyczna. Wybrane zagadnienia*”, Oficyna Wydawnicza PWR, 2011, Wrocław,

Opracował: dr inż. Igor Buzalewicz, Instytut Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej