

## Pochłanianie światła

### CELE

Przedmiotem doświadczenia jest zależność natężenia światła przechodzącego przez układ płytek przezroczystych od grubości materiału i liczności płytek.  
 Uzyskane pomiary są analizowane w oparciu o wykładnicze prawo absorpcji z uwzględnieniem odbić światła na granicy ośrodków.  
 W doświadczeniu wyznaczana jest wartość efektywnego współczynnika pochłaniania materiału płytek.

### CONTENTS

- I. Opis zjawisk
  - A. Podstawowe pojęcia radiometrii i fotometrii
  - B. Pochłanianie światła przez zestaw przezroczystych płytek.
- II. Zestaw pomiarowy
- III. Przebieg doświadczenia.
- IV. Analiza pomiarów z wykorzystaniem kalkulatora graficznego (TI83).
- V. Analiza pomiarów z wykorzystaniem arkusza MS Excel

### OPIS ZJAWISK

#### A. Podstawowe pojęcia radiometrii i fotometrii

Opis zjawisk i obserwacje propagacji energii fal świetlnych emitowanych przez źródła światła dokonywany jest na dwa sposoby.

**Radiometria** (zwana także fotometrią fizyczną) opiera się na pojęciu całkowitej energii promienistej emitowanej przez źródło, podczas gdy tzw. **fotometria wizualna** (zwana również fizjologiczną) zajmuje się jedynie tą częścią energii promienistej, która jest postrzegana przez ludzkie oko jako światło i uwzględnia czułość oka.

Widmo energii promienistej zwane światłem jest ograniczone i zawiera się ok. 300nm do 750nm. Fale o długościach krótszych (tzw. ultrafioletowe) lub dłuższe (tzw. podczerwone) nie wywołują wrażenia wizualnego.

Odpowiednio do opisu zjawisk stosowane są dwa zestawy wielkości i odpowiednich jednostek.

Symbole wielkości radiometrycznych są analogiczne do ich odpowiedników fotometrycznych – patrz tabela 1.

Wszystkie wielkości fotometrii wizualnej można otrzymać z odpowiednich wielkości radiometrycznych posługując się tzw. świetlnym równoważnikiem mocy promieniowania, uwzględniającym czułość widmową oka ludzkiego. Jego wartość wynosi: 683 lumen/wat.

**Tabela 1. Wielkości i jednostki radiometryczne i fotometryczne.**

Radiometria			Fotometria wizualna		
wielkość	symbol	jednostka	jednostka	symbol	wielkość
Energia promienista	$Q$	J	lm s	$Q$	ilość światła
Strumień promieniowania	$\Phi$	W	lm	$\Phi$	Strumień świetlny
Natężenie oświetlenia	$E$	W/m <sup>2</sup>	lm/m <sup>2</sup> =lx	$E$	Iluminancja
Natężenie kątowe	$I$	W/sr	lm/sr = cd	$I$	Światłość kierunkowa
Luminancja energetyczna	$L$	W/(m <sup>2</sup> sr)	lm/(m <sup>2</sup> sr)	$L$	Luminancja

Zestaw podstawowych wielkość radiometrycznych i fotometrii wizualnej jest podobny i obejmuje pojęcia:

### Moc źródła światła.

Źródło światła jest charakteryzowane przez całkowitą moc wypromieniowaną [w watach]. Wielkość tę nazywamy **strumieniem promieniowania** lub **strumieniem świetlnym** -  $\Phi$ .

W radiometrii jednostką strumienia  $\Phi$  jest **wat [W]**. Odpowiednikiem tej wielkości w fotometrii wizualnej tj. z uwzględnieniem obszaru widzialnego i czułości oka jest strumień świetlny, którego jednostką jest **lumen [lm]**.

### Natężenie światła.

Powszechnie używany termin 'natężenie światła' (jasność) odnosi się do energii wypromieniowanej w jednostce czasu przez źródło w jednostkowy kąt bryłowy.

Wielkość ta nosi nazwę **natężenia kąowego** -  $I$  i podawana jest w watach/steradian. Fotometrycznym odpowiednikiem jest **światłość kierunkowa**, której jednostką jest kandela [cd].

Natężenie kierunkowe służy min. do opisywania własności kierunkowych źródeł światła. Natężenie (światłość) jest definiowane jako:  $I(\Omega) = d\Phi/d\Omega$ .

### Oświetlenie.

Odbierane przez człowieka wrażenia wzrokowe w znacznej mierze opierają się na efektach świetlnych na powierzchniach oświetlanych obiektów.

Oznacza to, potrzebę opisu ilości energii promienistej, która dociera do elementu oświetlanej powierzchni.

**Natężenie oświetlenia** -  $E$ , opisuje strumień promieniowania, który dociera do jednostkowego pola oświetlanej powierzchni. Jednostką natężenia oświetlenia jest **Wat/m<sup>2</sup>**.

Fotometrycznym odpowiednikiem natężenia oświetlenia jest **iluminancja** podawana w luksach,  $I_x = \text{lm/m}^2$ .

Natężenie oświetlenia (i iluminancja) powierzchni oświetlanej przez punktowe źródło światła zależy od natężenia kąowego (światłości kierunkowej), odległości źródła od powierzchni oraz orientacji powierzchni względem kierunku propagacji energii promienistej -równ.1:

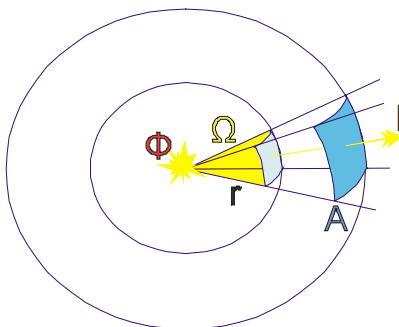
$$E = \frac{\text{strumień } \Phi}{\text{powierzchnia } A} = \frac{I \cdot \Omega}{A} = \frac{I \cdot A}{A \cdot r^2} = \frac{I}{r^2} \quad (1)$$

gdzie strumień świetlny w określonym kącie bryłowym dany jest przez :

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad (2)$$

a kąt bryłowy opisany jest jako:

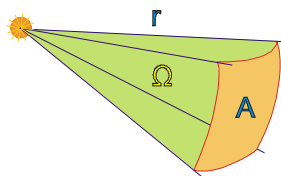
$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (3)$$



Rys.1. Strumień świetlny  $\Phi$  i światłość kierunkowa  $I$ .

Kąt bryłowy:

Kąt bryłowy  $\Omega$  definiowany jest przez stożek sferyczny wycinany z kuli. Kąt bryłowy związany jest z polem powierzchni  $A$  wycinanej przez stożek z kuli o promieniu  $r$ , której środek pokrywa się z wierzchołkiem stożka i wynosi:  $A/r^2$ . Jednostką kąta bryłowego jest **steradian [sr]**.

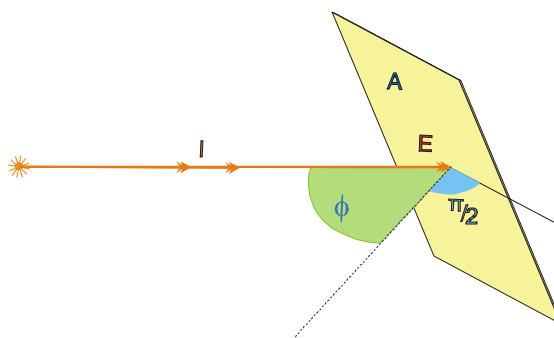


Rys.2. Kąt bryłowy

Jeśli energia promienista pada na powierzchnię pod kątem różnym od zera, wówczas natężenie oświetlenia powierzchni  $E$  jest modyfikowane, tak by opisywało efektywną powierzchnię - patrz rys.3:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \phi \quad (4)$$

gdzie  $\phi$  jest kątem zawartym pomiędzy kierunkiem prostopadłym do oświetlanej powierzchni i kierunkiem rozchodzenia się energii promienistej.



Rys. 3. Oświetlenie  $E$  powierzchni nachylonej.

### Prawo 'odwrotnych kwadratów'.

Natężenie oświetlenia na powierzchni oświetlanej przez punktowe źródło światła, które promieniuje energię jednorodnie we wszystkich kierunkach, stosuje się do tzw. prawa 'odwrotnych kwadratów'. Opisuje ono spadek ilości energii promieniowania padającego na jednostkową powierzchnię wraz ze wzrostem odległości od źródła.

Całkowity strumień promieniowania generowany przez źródło we wszystkich kierunkach ( w pełen kąt bryłowy) pozostaje stały podczas gdy powierzchnia kuli, w której energia ta jest zawarta rośnie proporcjonalnie do kwadratu jej promienia (odległości od źródła).

$$E \cong \frac{I}{r^2} \quad (5)$$

Tak więc, moc na jednostkę powierzchni maleje; porównaj rys. 1. Wiele zjawisk, np. oddziaływania w polu elektrostatycznym i grawitacyjnym opisywane jest zależnościami o podobnym charakterze.

## B. Pochłanianie światła przez zestaw przezroczystych płytek.

Energia wiązki światła przechodzącej przez układ optyczny ulega zmniejszeniu w rezultacie pochłaniania przez ośrodek i odbić na granicach różnych ośrodków.

Pochłanianie (absorpcja) oznacza zmniejszenie natężenia światła  $I$  i jest wynikiem wielu różnych zjawisk.

Część energii promienistej ulega zmianie w ciepło w rezultacie oddziaływania fali elektromagnetycznej z molekułami ośrodka. Ta strata energii jest zależna od długości drogi przebywanej przez falę w ośrodku oraz długości fali w ośrodku (a także, w mniejszym stopniu, od czynników zewnętrznych np. temperatury). Zanieczyszczenia i defekty struktury wywołują rozpraszanie energii, które zmniejsza natężenie wiązki efektywnie opuszczającej próbkę.

Zmniejszanie energii wiązki w wyniku przechodzenia przez ośrodek jest opisywane w różny sposób i z wykorzystaniem różnych zestawów wielkości, w tym np. współczynnik pochłaniania, współczynnik osłabiania, transmisja.

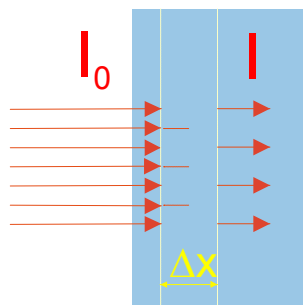
### Prawo pochłaniania.

Pochłanianie jest opisane przez empiryczne prawo zwane prawem **Beer'a-Lambert'a**, znanego także jako prawo **Beer'a** lub prawo **Beer'a-Lambert'a-Bouguer'a**.

Prawo Beer'a-Lambert'a dla ciał stałych stanowi, że w przypadku równoległej wiązki monochromatycznego światła przechodzącej przez jednorodny, przezroczysty materiał strata natężenia –  $\Delta I$  – jest proporcjonalna do długości drogi optycznej  $\Delta x$  w tym ośrodku oraz do natężenia wiązki  $I_0$  na wejściu do ośrodka – rys.4.

$$-\Delta I = I\tau\Delta x \quad (6)$$

gdzie  $\tau$  jest tzw. współczynnikiem pochłaniania (absorpcji), którego wartość przedstawia względną stratę natężenia wiązki po przejściu przez jednostkową grubość materiału. Jednostką współczynnika jest  $[m^{-1}]$ .



Rys.4. Osłabianie wiązki światła przechodzącego przez warstwę przezroczystego materiału

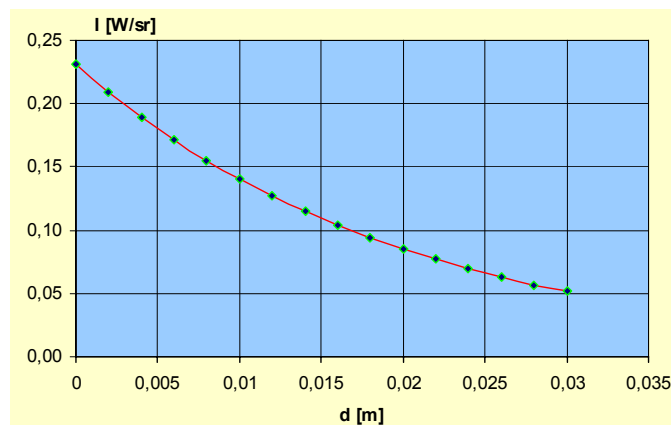
Współczynnik pochłaniania danego ośrodka jest zależny od częstości (i długości) fali padającego światła. Owocuje to szeregiem interesujących i powszechnie obserwowanych zjawisk, np. zabarwienia ciał.

W przypadku roztworów ciekłych współczynnik pochłaniania zależy dodatkowo od stężenia i rodzaju rozpuszczalnika.

Równanie 6 prowadzi do częściej spotykanej postaci, znanej jako wykładnicze prawo pochłaniania (7).

$$I = I_0 e^{-\tau x} \quad (7)$$

Prawo opisuje  $I$  wiązki po przejściu drogi  $x$  w ośrodku.  $I_0$  jest natężeniem wiązki wchodzącej do ośrodka. Równanie (7) wyraża tzw. prawo **Beer'a-Lambert'a** dla przezroczystego ośrodka stałego. Rys.5. przedstawia typową krzywą absorpcji.

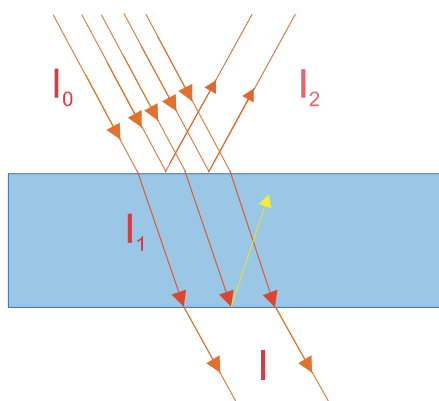


Rys.5. Zależność natężenia światła od grubości materiału. Wykładnicze pochłanianie.

#### Zmniejszanie energii wiązki w rezultacie odbić

W typowej sytuacji wiązka światła dociera do granicy ośrodka 'przychodząc' z innego ośrodka przezroczystego (o innym współczynniku załamania).

Na granicy dwóch ośrodków wiązka ulega częściowemu odbiciu – patrz rys.6.



Rys.6. Płytko płasko-równoległa. Pochłanianie i odbicie światła.

Natężenie wiązki odbitej jest opisane przez:

$$I_2 = I_0 \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (8)$$

Czynnik  $[(n-1)/(n+1)]^2 = R$  nosi nazwę współczynnika odbicia (zdefiniowanego dla danej pary ośrodków i niezależnego od kierunku rozchodzenia się światła).

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (9)$$

Gdzie  $n$  jest względnym współczynnikiem załamania ośrodka odbijającego względem otoczenia.

Tak więc natężenie wiązki efektywnie "wchodzącej" do ośrodka pochłaniającego jest pomniejszone o pewną część, co opisuje równanie 10:

$$I_1 = I_0(1 - R) \quad (10)$$

Wiązka, która efektywnie weszła do drugiego ośrodka jest osłabiana w wyniku pochłaniania przez ośrodek. (patrz równanie 7). Kiedy opuszczając ośrodek przechodzi przez jego powierzchnię graniczną, wówczas ponownie podlega częściowemu odbiciu.

Ostatecznie natężenie wiązki, która przeszła do otoczenia  $I$  jest osłabiona w rezultacie pochłaniania przez ośrodek i dwóch odbić na granicach próbki (patrz też rys.5.):

$$I = I_0(1 - R)^2 e^{-\tau d} \quad (11)$$

**Uwaga.** Równanie (11) nie uwzględnia wielokrotnych wtórnych odbić wiązki na granicy ośrodków. Jednakże, błąd będący rezultatem tego uproszczenia jest akceptowalnie mały - poniżej 0.2%.

W przypadku przechodzenia światła przez układ kilku przezroczystych, płasko równoległych płytek każda płytka redukuje natężenie w wyniku pochłaniania i dwóch odbić.

Dla zestawu składającego się z  $k$  płytek o jednakowej grubości  $d$  natężenie wiązki wychodzącej jest opisane przez:

$$I = I_0(1 - R)^{2k} \cdot e^{-\tau k d} \quad (12)$$

Postać (12) zależności nie jest wygodna przy eksperymentalnym wyznaczaniu współczynnika pochłaniania.

Po zlogarytmowaniu równania 12 otrzymuje się wygodniejszą do analiz liniową postać zależności natężenia od liczby płytek  $k$ :

$$\ln I = \ln I_0 + k \cdot [2 \ln(1 - R) - \tau d] \quad (13)$$

Tak więc, współczynnik pochłaniania  $\tau$  może zostać wyznaczony z nachylenia  $a$  prostej  $\ln I(k)$ :

$$\tau = \frac{1}{d} [2 \ln(1 - R) - a] \quad (14)$$

Doświadczalne wyznaczenie współczynnika pochłaniania materiału polega na obserwacji natężenia wiązki wychodzącej w funkcji zmieniającej się liczby płytek o stałej grubości.

Współczynnik pochłaniania jest zależny od częstości (długości) fali świetlnej.

W omawianym doświadczeniu użyto światła typowej żarówki o charakterystyce zbliżonej do światła białego. Zatem wyznaczony współczynnik należy traktować jako uśredniony, efektywny współczynnik pochłaniania użytego materiału.

### **ZESTAW POMIAROWY**

Obserwacja pochłaniania światła przy przechodzeniu przez układ płasko-równoległych płytek może zostać przeprowadzona w prostym układzie składającym się z typowej oprawy świetlnej zamocowanej na ławie optycznej łącznie z uchwytem płytek i czujnikiem natężenia światła.

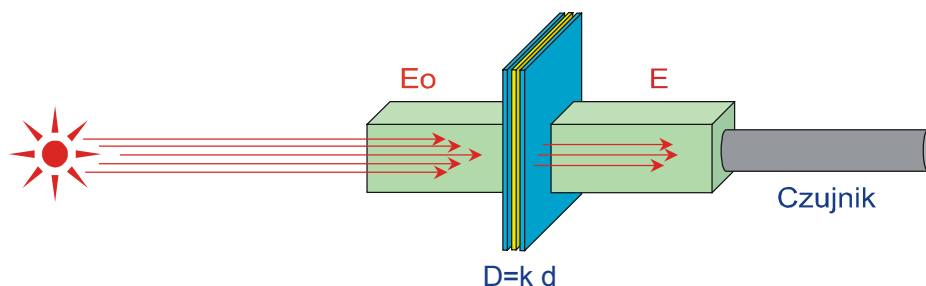
- patrz rys. 7.

Półprzewodnikowy czujnik światła ustawiony jest w stałej odległości od źródła światła (żarówki).

Sygnał wyjściowy czujnika jest proporcjonalny do natężenia oświetlenia  $E$  w płaszczyźnie detektora, podawanego w  $[mW/cm^2]$ .

Światło podlega pochłanianiu przez materiał płytek a także odbiciu na każdej granicy ośrodków, przez które przenika.

Omawiany układ zakłada punktowy charakter źródła światła. Tak więc, zgodnie z prawem 'odwrotnych kwadratów' uzyskane dane o wartościach natężenia oświetlenia mogą być odniesione do natężenia światła (światłości kierunkowej)  $I$ .



Rys.7. Schemat układu pomiarowego.

Zestaw pomiarowy składa się z :

- i. Goniometru z uchwytem do mocowania płytek.
- ii. Oprawy E14 i standardowej żarówki (15 - 40W).
- iii. Zestawu płasko-równoległych płytek o jednakowej grubości (np. podstawkowych szkieł mikroskopowych -  $d=1.6\text{mm}$  ). Typowa wartość współczynnika załamania materiału płytek wynosi  $n=1.5$ .
- iv. Urządzenia pomiarowego Calculator Based Laboratory (CBL)  
<http://www.vernier.com/legacy/cbl/index.html>  
lub CBL2  
<http://education.ti.com/us/product/tech/datacollection/features/cbl2.html>
- v. Czujnika światła (standardowego czujnika CBL)  
<http://www.vernier.com/probes/probes.html?ls-bta&template=standard.html>
- vi. Kalkulatora graficznego TI83, TI83 Plus, TI 84.
- vii. Kabla transmisji danych.
- viii. Programu: PHOT3– który można pobrać pod adresem:  
<http://www.lepla.edu.pl/>
- ix. Kabla interfejsu TI-GRAPH LINK™ (opcjonalnie)  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/cables.html#serialwin>  
Wraz z oprogramowaniem  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/downgraph.html>
- x. Komputera osobistego z oprogramowaniem TI Connect™ (opcjonalnie)  
Opis programu dostępny jest pod adresem:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/software.html>  
Pobranie pliku programu możliwe jest pod adresem:  
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/download.html>

#### Uwagi o przygotowaniu zestawu pomiarowego.

- Czujnik światła powinien być podłączony do wejścia kanału CH1 urządzenia pomiarowego CBL.
- Wykorzystywane w pomiarach płytki powinny być nieznacznie odseparowane od siebie przy montażu w uchwycie (np. przy pomocy cienkich, ok. 1mm, przekładek dystansowych).
- Należy dopasować położenie okna wejściowego uchwytu płytek i czujnika światła do wysokości położenia środka źródła światła.
- W czasie trwania pomiarów należy ograniczyć oświetlenie zewnętrzne i utrzymywać je na niezmiennym poziomie.

## **PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA (kalkulator TI 83)**

W doświadczeniu czujnik światła dokonuje pomiaru natężenia oświetlenia  $E$  w  $[mW/cm^2]$  w płaszczyźnie czujnika w funkcji liczby  $k$  przezroczystych płytek o jednakowej grubości  $d$ , przez które światło przechodzi. Uzyskane dane mogą być przedstawione na wykresie w prostokątnym układzie współrzędnych jako  $E(kd)$  lub jako  $E(k)$ .

Pomiary są prowadzone pod kontrolą programu **PHOT3** załadowanego i uruchomionego na kalkulatorze.

Procedura eksperymentalna podzielona jest na część przygotowawczą i pomiary właściwe.

### **Przygotowanie pomiarów:**

Wykonaj połączenia czujnika światła do urządzenia CBL i kalkulatora z CBL.

Pomierz grubości płytek. Wyznacz średnią grubość pojedynczej płytki  $d$ .

Uruchom kalkulator i urządzenie CBL.

Pomiary zasadnicze muszą być poprzedzone pomiarem oświetlenia zewnętrznego.

W tym celu należy ograniczyć oświetlenie zewnętrzne i zapewnić jego niezmienność.

Następnie wykonaj:

1. Na kalkulatorze uruchom program **PHOT3**, wybierając jego nazwę z listy otwieranej klawiszem **PRGM**.
2. Wybierz opcję ZERO PROBE z głównego menu programu rys.8.
3. Wyłącz wykorzystywane źródło światła i usuń wszystkie płytki z uchwytu mocującego. Uruchom pomiar naciskając klawisz [ENTER] – rys.9.



Fig.8.

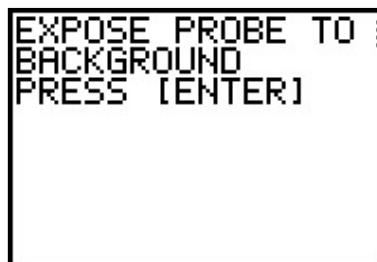


Fig.9.

Zmierzona wartość oświetlenia zewnętrznego będzie uwzględniana (odejmowana) w rejestrowanych wartościach pomiarów właściwych.

Opisana kalibracja może być wykonana raz dla danej serii pomiarowej pod warunkiem, że w czasie jej trwania nie zmieniają się warunki oświetlenia zewnętrznego.

### **Pomiar właściwy.**

1. Z głównego menu programu wybierz opcję 1: COLLECT DATA.
2. Po znaku zachęty wprowadź ustaloną wcześniej średnią wartość grubości pojedynczej płytki  $d$  w metrach - rys.10.
3. Włącz źródło światła.
4. W kolejnych krokach, po znakach zachęty, wsuwaj zestawy płytek. Pierwszy pomiar powinien być dokonany bez płytek w uchwycie. Każdorazowo uruchom pomiar – rys.11 i po znaku zachęty wprowadź liczbę płytek, które wsunąłeś do uchwytu - rys.12.
5. Dokonaj kolejnych pomiarów dla różnych liczb płytek, wybierając opcję 1: MORE DATA z menu DATA COLLECTION – rys.13.
6. Zakończ pomiary, wybierając opcję 2: STOP AND GRAPH z głównego menu programu.



7. Wybierz typ wykresu z menu DATA PRESENTATION – rys.14. Zebrane dane mogą być przedstawione w postaci zależności oświetlenia od łącznej grubości materiału płytek  $E(kd)$  lub zależności oświetlenia od liczby wprowadzonych płytek  $E(k)$  – rys.15.
8. Pomiary można powtórzyć, stosując te same lub zmienione ustawienia, włącznie z nową kalibracją oświetlenia zewnętrznego. W tym celu należy ponownie wybrać opcję 1:COLLECT DATA z głównego menu programu.
9. Zakończ pomiary, wybierając opcję 2: QUIT z głównego menu programu.
10. Uzyskane dane są zapisane w pamięci kalkulatora - rys.16.

Po zakończeniu pomiaru można odłączyć urządzenie CBL od kalkulatora i kontynuować analizę danych wykorzystując funkcje kalkulatora.

```

PLATE
THICKNESS [M]
?0.0016■
    
```

Fig.10.

```

INSERT
PLATES

PRESS ENTER
    
```

Fig.11.

```

HOW MANY PLATES
?1
    
```

Fig. 12

```

DATA COLLECTION :
1:MORE DATA
2:STOP AND GRAPH
    
```

Fig.13

```

DATA PRESENTATION:
1:ILLUM vs THICK
2:ILLUM vs No PL
3:MAIN MENU
    
```

Fig.14

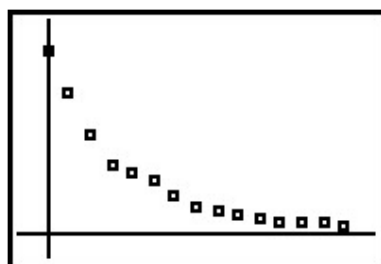


Fig.15.

```

DATA STORAGE
THICKNESS: L1
INTENSITY: L2
No OF PLATES L3
Done
    
```

Fig.16.

## **ANALIZA POMIARÓW Z WYKORZYSTANIEM KALKULATORA GRAFICZNEGO (TI83)**

Pogłębiona analiza eksperymentu może zostać dokonana przy wykorzystaniu narzędzi dostępnych w kalkulatorach graficznych (lub oprogramowania do analizy danych takich jak arkusz kalkulacyjny MS Excel).

Uzyskane w pomiarach dane zachowane są w kalkulatorze w postaci list - rys.16:

- łączna grubość zestawu płytek  $d$  w metrach - lista  $L_1$
- natężenie oświetlenia  $E$  w  $W/cm^2$  - lista  $L_2$
- liczba płytek w zestawie  $k$  - lista  $L_3$

Przykładowe dane w postaci plików formatu TI83 można pobrać jako:

- łączna grubość zestawu płytek  $d$  w metrach, plik - Data sample/TI83/  $L_1$
- natężenie oświetlenia  $E$  w  $W/cm^2$ , plik - Data sample/TI83/  $L_2$
- liczba płytek w zestawie  $k$  plik - Data sample/TI83/  $L_3$

Wykresy zależności pomiędzy zestawami danych eksperymentalnych są zdefiniowane jako Plot1 ( $L_2, L_1$ ) i Plot2 ( $L_2, L_3$ ) i mogą być wyświetlone z poziomu menu STAT PLOT.

### **Analiza wykresów**

Przy założeniu stałej odległości czujnika światła od źródła, zarejestrowane zmiany wartości natężenia oświetlenia  $E$  mogą posłużyć do analizy zależności odpowiadającego im natężenia (światłości kierunkowej)  $I(kd)$ . Dodatkowo, w analizie należy wykorzystać wykładnicze prawo pochłaniania.

Po uwzględnieniu odbić światła na granicach ośrodków analiza pomiarów może zostać przeprowadzona w oparciu o równanie 12, które uwzględnia straty wywołane zarówno przez pochłanianie, jak i efekt odbić:

$$I = I_0(1 - R)^{2k} e^{-\tau kd} \quad (12)$$

W wyniku analizy zależności obserwowanego natężenia oświetlenia od liczby płytek wstawionych w tor wiązki światła można określić współczynnik pochłaniania  $\tau$  materiału płytek.

Oryginalne wartości natężenia powinny zostać zlogarytmowane, jako że logarytmiczna forma równania 12 przyjmuje postać zależności liniowej:

$$\ln I = \ln I_0 + k \cdot [2 \ln(1 - R) - \tau d] \quad (13)$$

Współczynnik pochłaniania można wyznaczyć z wartości nachylenia  $a$  liniowej zależności  $\ln I(k)$ :

$$\tau = \frac{1}{d} [2 \ln(1 - R) - a] \quad (14)$$

### **Linearyzacja**

Zgodnie z równaniem 13 wykres  $E(k)$  ma postać liniową. W celu ustalenia parametrów tej zależności oryginalne, eksperymentalne wartości natężenia oświetlenia  $E$  zapisane w liście  $L_2$  muszą zostać przetworzone w  $\ln(E)$ .

Przetworzone dane zachowujemy w nowej liście  $L_4$  - rys.17.

Następnie należy zdefiniować nowy wykres, tak by przedstawiał zależność list  $L_4$  i  $L_3$  - rys. 18.

Rozkład punktów na wykresie uzasadnia zastosowanie liniowego modelu regresji w poszukiwaniu postaci zależności funkcyjnej wyświetlanych danych.

Funkcja wyznaczająca parametry regresji liniowej wywoływana jest z menu STAT CALC - rys.19.

Jako argumenty funkcji regresji należy podać nazwy list oraz nazwę zmiennej  $Y_1$ , w której zachowana zostanie wyznaczona postać funkcji - rys. 20.

Jako wynik operacji wyświetlony zostaje zestaw parametrów wyznaczonej funkcji. – rys. 21.  
Współczynnik korelacji  $r$  określa jakość zastosowanego modelu regresji.  
W podanym przykładzie wartość  $r$  jest bliska 1, o świadczy o dobrej korelacji liniowej pomiędzy wartościami logarytmów natężenia  $E$  i liczbą płytek  $k$ .  
Naniesienie na wykres uzyskanej prostej regresji pozwala na jej porównanie z rozkładem punktów pomiarowych. – rys. 22.

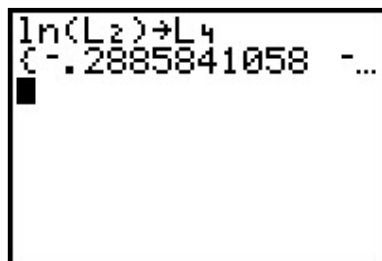


Fig.17

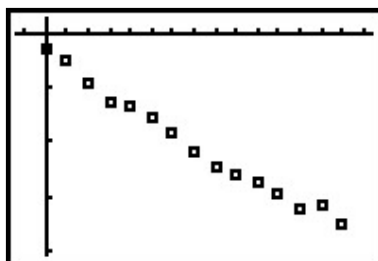


Fig.18

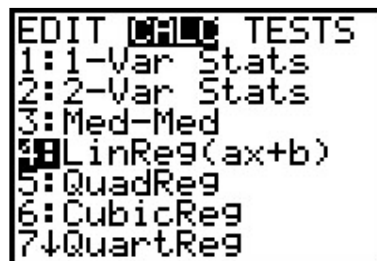


Fig.19

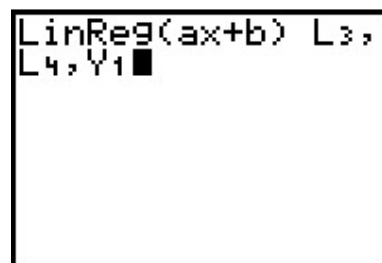


Fig.20

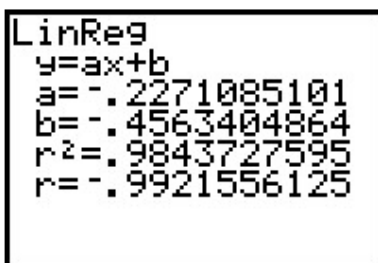


Fig.21

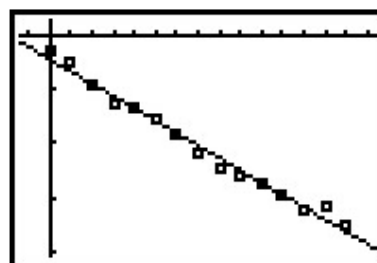


Fig.22

### Obliczenie wartości współczynnika pochłaniania

Zgodnie z równaniem 14 wartość współczynnika pochłaniania  $\tau$  można uzyskać z nachylenia  $a$  wyznaczonej postaci zależności liniowej.

W tym celu należy najpierw obliczyć wartość współczynnika odbicia  $R$ , wykorzystując przyjętą wartość współczynnika załamania światła  $n$  materiału płytek – równ. 9. Obliczoną wartość współczynnika  $R$  należy zapamiętać pod wybranym symbolem stałej – rys.23.

Obliczenie współczynnika pochłaniania  $\tau$  można wykonać, pamiętając o tym że średnia grubość pojedynczej płytki  $d$  jest zapisana w zmiennej o symbolu  $D$ , zaś wartość współczynnika kierunkowego prostej regresji  $a$  przywołać można z menu VARS Statistics – rys. 24. Ostatecznie otrzymuje się poszukiwaną wartość współczynnika pochłaniania (w  $[m^{-1}]$ ) – rys. 25.

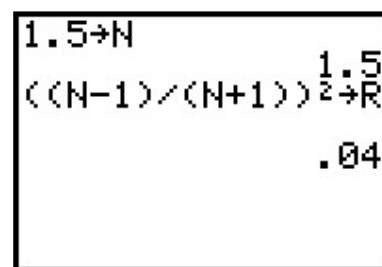


Fig.23

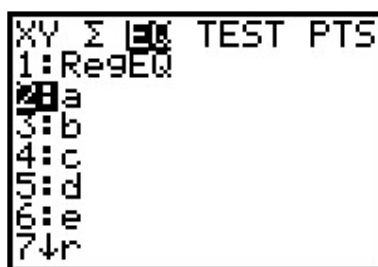


Fig.24

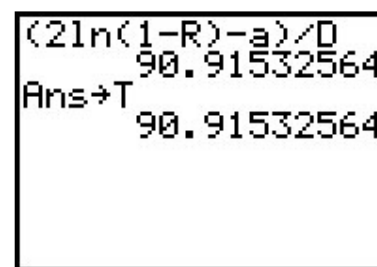


Fig.25

## **ANALIZA POMIARÓW Z WYKORZYSTANIEM ARKUSZA MS EXCEL**

Analiza eksperymentu może zostać dokonana przy wykorzystaniu oprogramowania do analizy danych takich jak arkusz kalkulacyjny MS Excel.

### **Przeniesienie danych z kalkulatora do komputera.**

Uzyskane dane mogą zostać, po zakończeniu pomiaru, przeniesione z kalkulatora do komputera. Kabel TI GRAPH LINK™ wraz z oprogramowaniem TI Connect™ umożliwia dostęp do zawartości pamięci kalkulatora (TI DEVICE EXPLORER) oraz edycję danych (TI DATA EDITOR).

Uzyskane w pomiarach dane zachowane są w kalkulatorze w postaci list - rys.16:

- łączna grubość zestawu płytek ***d*** w metrach - lista  $L_1$
- natężenie oświetlenia ***E*** w  $W/cm^2$  - lista  $L_2$
- liczba płytek w zestawie ***k*** - lista  $L_3$

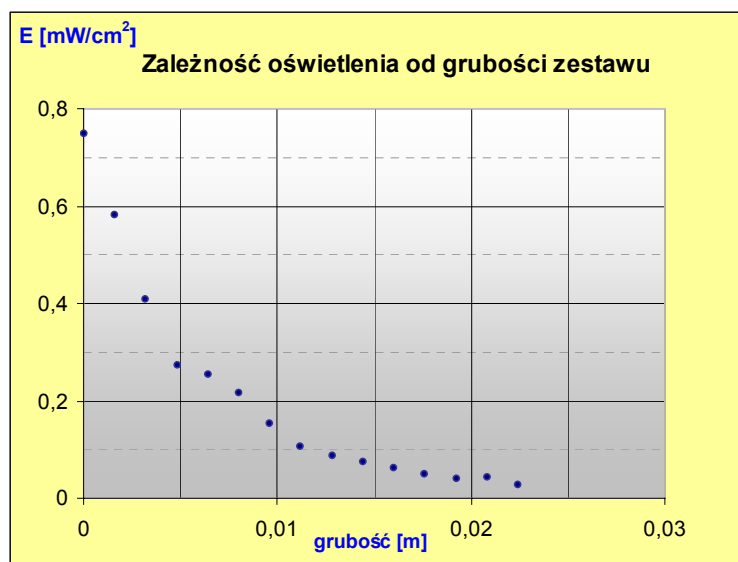
W ramach programu TI Connect™ - narzędzie TI DEVICE EXPLORER umożliwia zapisanie na dysku komputera listy zachowanej w kalkulatorze a następnie jej edycję w edytorze danych TI DATA EDITOR. Tryb eksportu - Special Lists Export umożliwia także zapisanie wskazanej listy w pliku o formacie Excel (plik \*.CSV). Taki plik może być otwierany i przetwarzany przez program MS Excel.

Przykładowe dane w postaci plików formatu MS Excel można pobrać jako:

- łączna grubość zestawu płytek ***d*** w metrach, plik - Data sample/MSEExcel/**thick**
- natężenie oświetlenia ***E*** w  $W/cm^2$ , plik - Data sample/MSEExcel/**intensity**
- liczba płytek w zestawie ***k***, plik Data sample/MSEExcel/**kplates**

### **Analiza wykresów**

Utwórz nowy arkusz i pobierz dane z plików: **thick**, **kplates** and **intensity**. Utwórz wykres  $E(d)$  z oryginalnych danych eksperymentalnych. Wybierz punktowy typ wykresu – rys. 26.



Rys. 26. Zależność oświetlenia od grubości układu płytek. Dane eksperymentalne

Przy założeniu stałej odległości czujnika światła od źródła, zarejestrowane zmiany wartości oświetlenia ***E*** mogą posłużyć do analizy zależności odpowiadającego im natężenia (światłości kierunkowej) ***I*** (***kd***).

Dodatkowo, w analizie należy wykorzystać wykładnicze prawo absorpcji.

Po uwzględnieniu odbić światła na granicach ośrodków analiza pomiarów może zostać przeprowadzona w oparciu o równanie 12, które uwzględnia straty wywołane zarówno przez pochłanianie, jak i efekt odbić.

W wyniku analizy zależności obserwowanego natężenia oświetlenia od liczby płytek wstawionych w tor wiązki światła można określić współczynnik pochłaniania  $\tau$  materiału płytek.

Oryginalne wartości natężenia powinny zostać zlogarytmowane, jako że logarytmiczna forma równania 12 przyjmuje postać zależności liniowej:

$$\ln I = \ln I_0 + k \cdot [2 \ln(1 - R) - \tau d] \quad (13)$$

Współczynnik pochłaniania można wyznaczyć z wartości nachylenia liniowej zależności  $\ln I(k)$ .

$$\tau = \frac{1}{d} [2 \ln(1 - R) - a] \quad (14)$$

### Linearyzacja

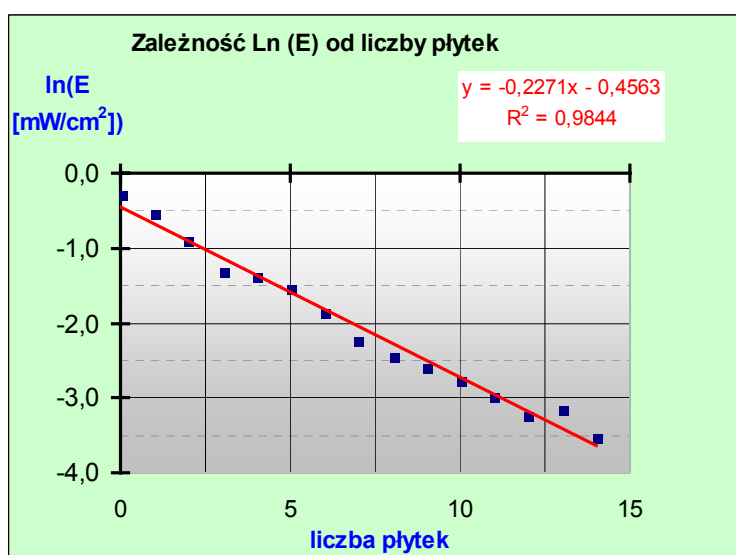
Zgodnie z równaniem 13 wykres  $E(k)$  ma postać liniową. W celu ustalenia parametrów tej zależności oryginalne, eksperymentalne wartości natężenia oświetlenia  $E$  muszą zostać przetworzone w  $\ln(E)$  i zapisane w oddzielnej kolumnie arkusza.

Następnie należy zdefiniować i wykonać nowy wykres przedstawiający zależność  $\ln(E)$  od  $k$  - rys. 27.

Rozkład punktów na wykresie uzasadnia zastosowanie liniowego modelu regresji w poszukiwaniu postaci zależności funkcyjnej wyświetlanych danych.

Aby wyznaczyć postać tej zależności należy na nanieść na wykres linię trendu. W opcjach linii trendu należy wybrać typ liniowy. Ustalona linia trendu zostanie naniesiona na wykres wraz z wyznaczoną postacią funkcji regresji. – rys.27.

Wartość podanego współczynnika determinacji  $R^2$  określa jakość dopasowania przyjętego modelu regresji. W podanym przykładzie wartość  $R^2$  jest bliska 1 co świadczy o dobrej korelacji liniowej pomiędzy wartościami logarytmów natężenia  $E$  i liczbą płytek  $k$ .



Rys. 27. Logarytmiczna zależność oświetlenia od liczby płytek.

### Obliczenie wartości współczynnika pochłaniania

Zgodnie z równaniem 14 wartość współczynnika pochłaniania  $\tau$  można uzyskać z nachylenia wyznaczonej postaci zależności liniowej.

W tym celu należy najpierw obliczyć wartość współczynnika odbicia  $R$ , wykorzystując przyjętą wartość współczynnika załamania światła materiału płytek  $n$ .

Ostatecznie otrzymuje się poszukiwaną wartość współczynnika pochłaniania (w [m<sup>-1</sup>]) - rys. 28.

OBLICZENIA		
współczynnik załamania $n =$	1,5	
współczynnik odbicia $R =$	0,04	
nachylenie prostej $\ln E(k)$ $a =$	-0,2271	
grubość pojedynczej płytki $d =$	0,0016	[m]
współczynnik pochłaniania $t =$	90,9100	[m <sup>-1</sup> ]

Rys. 28. Zestawienie obliczeń.

Wyznaczoną wartość współczynnika pochłaniania należy traktować jako efektywną dla danego składu widmowego użytej wiązki światła.

Obserwacje i analizę można rozszerzyć dokonując pomiarów absorpcji na pojedynczej płytce o grubości porównywalnej z łączną grubością użytego zestawu płytek.

Porównanie transmisji światła przez układ płytek i pojedynczą, grubą płytkę pozwoli zauważyć istotną rolę odbić na granicach płytek w efektywnym osłabianiu wiązki przez warstwowy układ płytek.

Uwaga:

Kompletną analizę przykładowych danych eksperymentalnych zawiera specjalnie opracowany plik arkusza MS Excel:

**Data sample/MSExcels/absanalysis.xls**