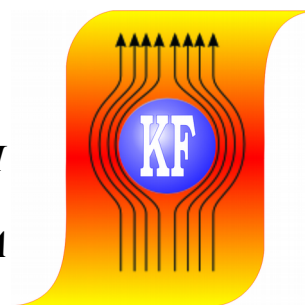
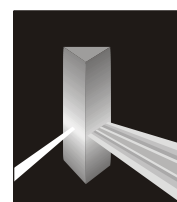


***KATEDRA FIZYKI***

***WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI  
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW  
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA***



***PRACOWNIA OPTYKI***



**ĆWICZENIE NR 0-12**

***WYZNACZANIE STAŁEJ KERRA***

**I. Zagadnienia do przestudiowania**

1. Polaryzacja, dwójłomność, anizotropia optyczna
2. Zjawisko Kerra
3. Zasada działania: lasera, modulatora elektrooptycznego, fotodetektora
4. Zasada pomiaru stałej Kerra, element PLZT

**II. Wprowadzenie teoretyczne**

Elektrooptyczne zjawisko Kerra (kwadratowe elektrooptyczne zjawisko Kerra) to pojawianie się dwójłomności w ośrodku izotropowym pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. Zjawisko to zostało odkryte w 1875 r. przez szkockiego fizyka Johna Kerra, który badał zachowanie się promienia świetlnego przechodzącego przez płytę szkła, gdy prostopadle do biegu promieni świetlnych było przykładane wysokie napięcie. Dla pewnych wartości tego napięcia szkło okazywało się dwójłomne, natomiast po wyłączeniu pola elektrycznego efekt ten znikał. Takie samo zjawisko zaobserwowano w cieczach.

W przypadku kwadratowego zjawiska elektrooptycznego ośrodek zyskuje dwójłomność w wyniku układania się polarnych cząsteczek ośrodka w kierunku zewnętrznego pola elektrycznego. Uporządkowaniu cząsteczek przeciwdziałają ich ruchy termiczne, dlatego efekt zmniejsza się ze wzrostem temperatury pomiaru.

Poniżej przedstawiono uproszczony, skalarny opis zachowania się promienia światła przechodzącego przez ciało stałe (komórkę Kerra), które nie krystalizuje w układzie regularnym. Aby zaobserwować kwadratowe zjawisko elektrooptyczne przykładamy pole elektryczne do badanej komórki w kierunku prostopadłym do promienia światła spolaryzowanego liniowo. Na wyjściu komórki światło spolaryzowane będzie eliptyczne, a parametry tej elipsy będą zależne od drogi światła w ośrodku, natężenia pola elektrycznego i rodzaju substancji. Promień światła, którego wektor pola elektrycznego drga równoległe do przyłożonego pola elektrycznego będziemy nazywać promieniem nadzwyczajnym, a promień światła, którego wektor pola drga prostopadle do tego pola - promieniem zwyczajnym. Różnica dróg optycznych pomiędzy promieniami zwyczajnym i nadzwyczajnym wyniesie:

$$L = l(n_n - n_z) \quad (1)$$

gdzie  $n_n$  jest współczynnikiem załamania promienia nadzwyczajnego,  $n_z$  – współczynnikiem załamania promienia nadzwyczajnego,  $l$  – odległością, jaką przebywa światło w elemencie PLZT.

W związku z tym różnica faz  $\Delta$  wytworzona na długości drogi  $l$  wiązek nadzwyczajnej i zwyczajnej w ośrodku wyniesie:

$$\Delta = 2\pi \frac{l}{\lambda} (n_n - n_z) \quad (2)$$

gdzie  $\lambda$  jest długością fali w próżni promieniowania padającego na komórkę Kerra.

Przesunięcie fazowe jest proporcjonalne do odległości  $l$  i kwadratu polaryzacji  $P$ . Jeżeli przyjmiemy, że polaryzacja jest liniową funkcją natężenia pola elektrycznego, a współczynnik proporcjonalności wynosi  $2\pi K$ , powyższą relację można zapisać jako:

$$\Delta = 2\pi K l E^2 \quad (3)$$

gdzie:  $K$  jest stałą Kerra oraz  $E$  – natężeniem pola elektrycznego przyłożonego do komórki Kerra. Zmiana fazy pomiędzy promieniami zwyczajnym i nadzwyczajnym, powstała w trakcie przechodzenia światła przez komórkę Kerra, jest proporcjonalna do kwadratu przyłożonego do niej napięcia. Natężenie pola elektrycznego można wyrazić przez napięcie  $U$  przyłożone do elektrod i odległość między nimi  $d$  jako:

$$E = \frac{U}{d}. \quad (4)$$

Natężenie światła  $I$  poza analizatorem, dla układu laboratoryjnego polaryzatora i analizatora skręconych po  $45^\circ$  względem kierunku pola elektrycznego w komórce jest wyznaczane ze wzoru:

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\Delta}{2}\right), \quad (5)$$

gdzie  $I_0$  jest natężeniem światła poza analizatorem gdy polaryzator i analizator są ustawione w tej samej płaszczyźnie polaryzacji, a pole elektryczne w komórce jest zerowe. Wykorzystując równanie (3) - (5), otrzymujemy:

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi KlU^2}{d^2}\right), \quad (6)$$

a następnie, w celu uproszczenia dalszych obliczeń:

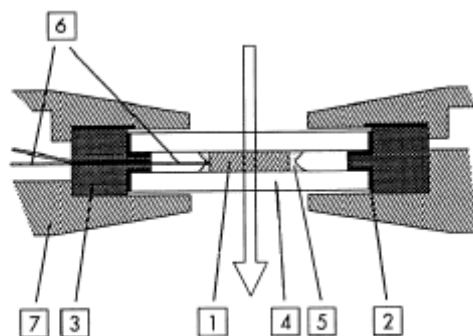
$$U^2 = \frac{d^2}{\pi Kl} \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}. \quad (7)$$

Wykres funkcji  $U^2 = f\left(\arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}\right)$  będzie w przybliżeniu linią prostą. Stałą Kerra  $K$  wyznaczymy

z tangensa kąta nachylenia prostej do osi  $\arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}$ .

### III. Zestaw pomiarowy

Komórka Kerra jest wykonana z ceramicznego kompozytu PLZT o następującym udziale wagowym składników: Pb 0.9125, La 0.0875, Zr 0.65, Ti 0.3503. Badany element PLZT jest przezroczysty dla fal elektromagnetycznych o długościach od 0,4 do 5,6  $\mu\text{m}$ . Dla fali 633 nm (światło czerwone) współczynnik transmisji jest większy od 60%. Element PLZT zachowuje się jak przezroczysty polikryształ. W stosunku do przyłożonego pola elektrycznego zachowuje się analogicznie do ferromagnetyka włożonego do pola magnetycznego. Domeny w elemencie PLZT są wstępnie spolaryzowane, a przyłożone napięcie powoduje wzrost ich objętości oraz zmianę orientacji zgodną z kierunkiem przyłożonego pola. Element aktywny modulatora elektrooptycznego na bazie PLZT [1] pokazany na rys.1 jest równoległościannem o wysokości 8 mm, długości (droga rozchodzenia się światła)  $l=1,5$  mm i szerokości (odległość między elektrodami)  $d=1,4$  mm.

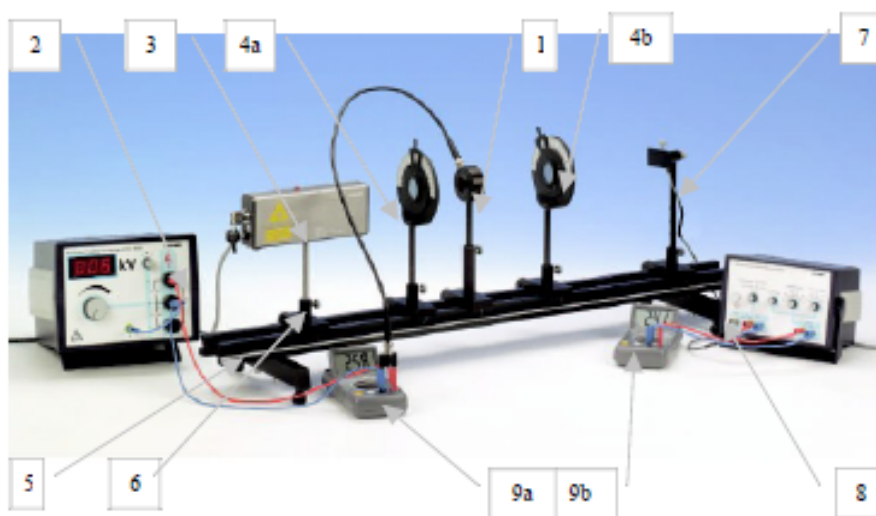


Rys.1 Przekrój przez element PLZT w płaszczyźnie padania światła

Element ten jest zamknięty hermetycznie z użyciem krzemowego pierścienia izolującego [3] i zaklejony pomiędzy dwiema płytkami szklanymi [4]. Dla zapewnienia przezroczystości optycznej jako klej [2] został użyty balsam kanadyjski. Druty [6] są przymocowane do elektrody od czoła elementu i łączą się z gniazdkiem BNC na obudowie [7].

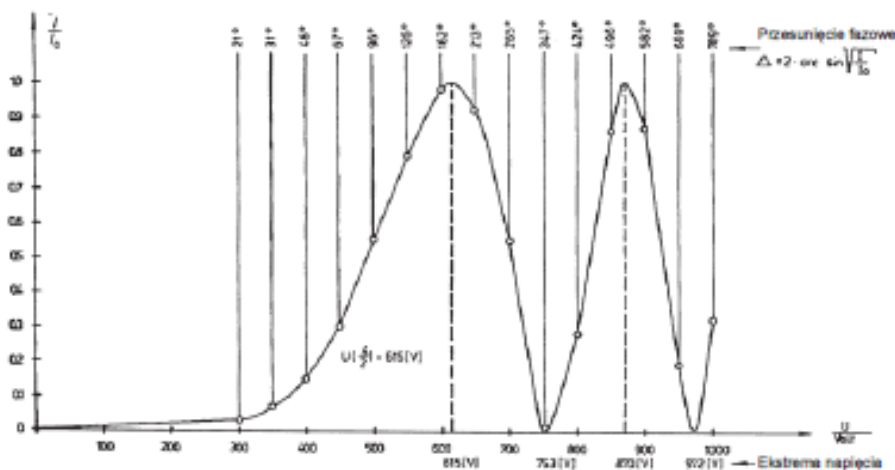
Układ laboratoryjny jest przedstawiony na rys.2 i zawiera następujące elementy:

1. komórkę Kerra (modulator elektrooptyczny na bazie PLZT);
2. zasilacz wysokiego napięcia (0-10 kV);
3. laser He-Ne 1.0 mW, z zasilaczem AC 230 V;
4. 2 filtry polaryzacyjne na stojakach: a) polaryzator, b) analizator;
5. ławę optyczną;
6. uchwyty ślizgowe do ławy optycznej;
7. fotodetektor;
8. uniwersalny wzmacniacz pomiarowy;
9. 2 cyfrowe multimetry pracujące jako woltomierze.



Rys. 2 Widok zestawu laboratoryjnego

Element PLZT [1] jest podłączony bezpośrednio do zasilacza wysokonapięciowego [2]. Napięcie zasilające może być ustawiane od 0 do 10 000 V z precyzją większą niż zapewnia wyświetlacz zasilacza dzięki cyfrowemu woltomierzowi [9a], podłączonemu równolegle do zasilacza [2]. Nie wolno przekraczać napięcia 1000 V na zasilaczu, bo zniszczy to element PLZT. Źródłem światła jest laser He/Ne [3] o mocy 1 mW. Przed przystąpieniem do pracy z układem laboratoryjnym należy zapoznać się z warunkami BHP pracy z laserami. Światło z lasera He/Ne [3] jest spolaryzowane liniowo przez polaryzator [4a]. Liniowo spolaryzowana fala świetlna może być rozpatrywana jako złożenie dwóch fal o jednakowych fazach, spolaryzowanych tak, że jedna jest równoległa a druga prostopadła do kierunku pola elektrycznego przyłożonego do elementu PLZT. Monochromatyczne, pionowo spolaryzowane światło pada na element PLZT który jest umocowany pod kątem  $45^\circ$  do pionu. Dwie fale świetlne przechodzą przez element PLZT z różnymi prędkościami. Promień, w którym występują drgania prostopadłe względem pola elektrycznego jest opóźniony w stosunku do promienia, w którym występują drgania wektora elektrycznego równoległe do tego pola, co powoduje powstanie różnicy faz pomiędzy falami wychodzącymi z elementu PLZT. W wyniku tego, na analizator [4b] pada światło spolaryzowane eliptycznie. Za analizatorem znajduje się fotodetektor [7], którym jest fotodioda krzemowa, używana wraz ze wzmacniaczem [8].



**Rys.3** Względne natężenie światła poza analizatorem jako funkcja napięcia  $U$  przyłożonego do elementu PLZT. W celu lepszego zobrazowania zjawiska naniesiono kąty przesunięcia fazowego pomiędzy promieniami zwyczajnym i nadzwyczajnym.

Gdy do komórki Kerra nie przykładamy napięcia - analizator, który jest usytuowany pod kątem  $90^\circ$  względem polaryzatora powoduje wygaszenie światła, dochodzącego do fotodetektora. Ze wzrostem napięcia następuje wzrost intensywności światła docierającego do fotodetektora. W przedstawionym przypadku pierwsze maksimum natężenia jest widoczne przy napięciu 615 V. Napięcie to, zwane napięciem półfalowym, wywołuje przesunięcie fazowe pomiędzy promieniami zwyczajnym i nadzwyczajnym równe  $180^\circ$ . Wyznaczona wartość stałej Kerra w omawianym przypadku wynosi  $K=2,7 \cdot 10^{-9} (\text{m/V}^2)$ .

## Przebieg ćwiczenia

### Zasady BHP

Ponieważ w ćwiczeniu wykorzystywane jest promieniowanie laserowe, źródła wysokiego napięcia oraz niezwykle delikatne elementy optyczne, od studenta jest wymagane stosowanie się do poniższych zasad:

- 1) Nie wolno patrzeć wprost w wiązkę laserową, gdyż może to doprowadzić do trwałej utraty wzroku.
- 2) Nie wolno kierować wiązki laserowej na inne osoby.
- 3) Nie wolno dotykać wyjść zasilaczy wysokiego napięcia. Grozi to porażeniem prądem.
- 4) Nie wolno dotykać elementów optycznych (polaryzatorów, okienek lasera), gdyż może to doprowadzić do ich zniszczenia.

Przed wykonywaniem jakichkolwiek pomiarów natężenia światła laser He/Ne musi być włączony na około 60 minut wcześniej, aby ustabilizować jego emisję.

Po każdej zmianie napięcia przykładanego do elementu PLZT lub zmianie warunków oświetlenia powinno minąć około 5 minut, aby można uzyskać wiarygodny odczyt (zanim ustali się nowa struktura krystaliczna). Konstrukcja fotodetektora wymaga aby wszystkie pomiary wykonywać w zaciemnionym pomieszczeniu.

### Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie stałej Kerra dla elementu PLZT. W tym celu badamy względne natężenie światła za analizatorem jako funkcję napięcia działającego na element PLZT

**V. Tabela pomiarowa**

l.p	Napięcie U [V]	Natężenie I [j.u.]	I/I <sub>0</sub>	$\frac{\Delta}{2} = \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}$	K [m/V <sup>2</sup> ]	$\Delta K$ [m/V <sup>2</sup> ]	$K \pm \Delta K$ [m/V <sup>2</sup> ]
1	0	I <sub>0</sub>					
2	300						
3	350						
4	400						
5	450						
6	500						
7	550						
8	600						
9	650						
10	700						
11	750						
12	800						
13	850						
14	900						
15	950						
16	1000						

**VI. Opracowanie ćwiczenia**

- Na podstawie wyników zestawionych w tabeli rysujemy wykres zależności  $\frac{I}{I_0} = f(U)$ . Na wykres nanosimy również przesunięcie fazowe  $\Delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}$ , odpowiadające danej wartości napięcia U. Odczytujemy napięcie półfalowe.
- Sporządzamy wykres zależności  $U^2 = f\left(\arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}\right)$ .
- Wykorzystując metodę regresji liniowej, uzyskujemy współczynnik nachylenia  $a$  oraz współczynnik  $b$  prostej  $y = ax + b$ , gdzie  $x = \arcsin \sqrt{\frac{I}{I_0}}$ , natomiast  $y = U^2$ .
- Zgodnie ze wzorem (7), współczynnik nachylenia  $a = \frac{d^2}{\pi Kl}$ . Podstawiając  $l = 1,5 \text{ mm}$  i  $d = 1,4 \text{ mm}$ , uzyskujemy wartość stałej Kerna:  $K = \frac{d^2}{\pi la}$ .
- Na wykresie, sporządzonym zgodnie z punktem 2, nanosimy prostą teoretyczną, uwzględniając obliczone parametry  $a$  oraz  $b$ .
- Wyniki wpisujemy do tabeli.

**Rachunek błędu**

1. Niepewność pomiarową wyznaczonej stałej Kerra obliczamy ze wzoru

$$\sigma_K = \left| -\frac{d^2}{\pi l a^2} \right| \sigma_a = K \frac{\sigma_a}{a}$$

2. Zaokrąglamy wartości  $K$  i  $\sigma_K$  zgodnie z obowiązującymi normami.
3. Obliczamy względną niepewność pomiaru wyznaczonej wielkości.

**Literatura**

1. Catalogue PHYWE LEP [www.phywe.de](http://www.phywe.de)
2. S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna cz. 4, PWN 1982
3. D. Halliday, R. Resnick; Fizyka dla studentów nauk przyrodniczych i technicznych, t.II Warszawa PWN 1998
4. II Pracownia Fizyczna, Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki dla zaawansowanych, red. F. Kaczmarek, Wyd. PWN Warszawa – Poznań 1976
5. J. Lech Opracowanie wyników pomiarów w laboratorium podstaw fizyki, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Częstochowa 2005

**Zasada sporządzania wykresów**

Prawidłowe opracowanie wyników pomiarów wymaga wykonania odpowiedniego wykresu. Podczas robienia wykresu należy kierować się następującymi zasadami:

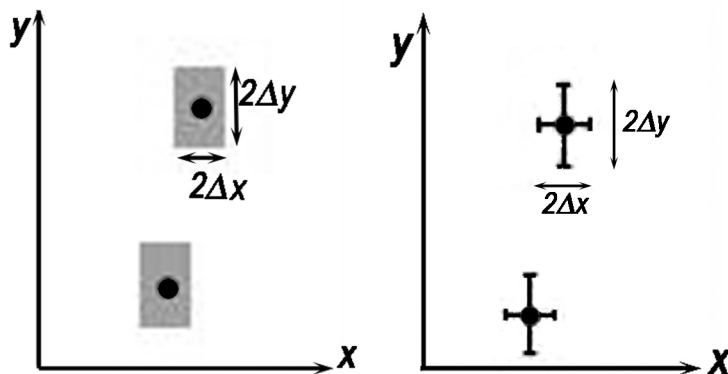
1. Wykres wykonuje się na papierze milimetrowym. Na układzie współrzędnych definiujemy liniowe osie liczbowe w przedziałach zgodnych z przedziałami zmienności wartości  $X$  i  $Y$ ; oznacza to, że na każdej z osi odkładamy tylko taki zakres zmian mierzonej wielkości fizycznej, w którym zostały wykonane pomiary. Nie ma zatem obowiązku odkładania na osiach punktów zerowych, gdy nie było w ich okolicy punktów pomiarowych (chyba, że w dalszej analizie konieczne będzie odczytanie wartości  $Y$  dla  $X=0$ ). Skalę na osiach układu nanosimy zazwyczaj w postaci równooddalonych liczb. Ich wybór i gęstość na osi musi zapewniać jak największą prostotę i wygodę korzystania z nich.

Na osiach wykresu muszą być umieszczone odkładane wielkości fizyczne i ich jednostki lub miary.

2. Punkty nanosimy na wykres tak, by były wyraźnie widoczne, zaznaczamy je kółkami, trójkątami, kwadracikami itp. Na rysunku należy zaznaczyć również niepewności pomiarowe w postaci prostokątów lub odcinków.

*Graficzne przedstawienie niepewności systematycznej:*

Założmy, że wartości  $x$  i  $y$  otrzymane z pomiarów są obarczone odpowiednio niepewnościami  $\Delta x$  i  $\Delta y$ . Oznacza to, że rzeczywiste wartości tych wielkości mieszczą się w przedziałach od  $x - \Delta x$  do  $x + \Delta x$  oraz od  $y - \Delta y$  do  $y + \Delta y$ . Na wykresie zależności  $Y(X)$  przedziały te wyznaczają wokół punktów  $(x, y)$  prostokąty o bokach  $2\Delta x$  i  $2\Delta y$ . Niepewności te można również zaznaczać wokół punktu pomiarowego  $(x, y)$  poprzez odcinki o długości  $2\Delta x$  i  $2\Delta y$  (rys.1)



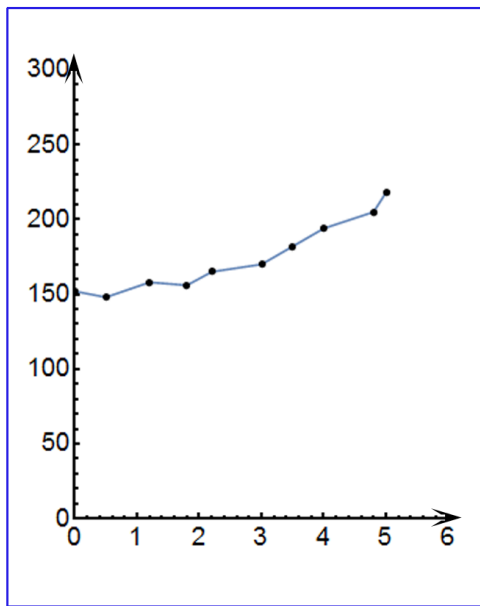
Rys.1 Zaznaczanie niepewności wokół punktów pomiarowych.

**Uwaga:** Jeżeli wartość zmiennej  $X$  jest dokładnie znana (czyli  $\Delta x = 0$ ), to na wykresie zaznaczamy tylko niepewności na osi zmiennej zależnej (na osi  $y$ ).

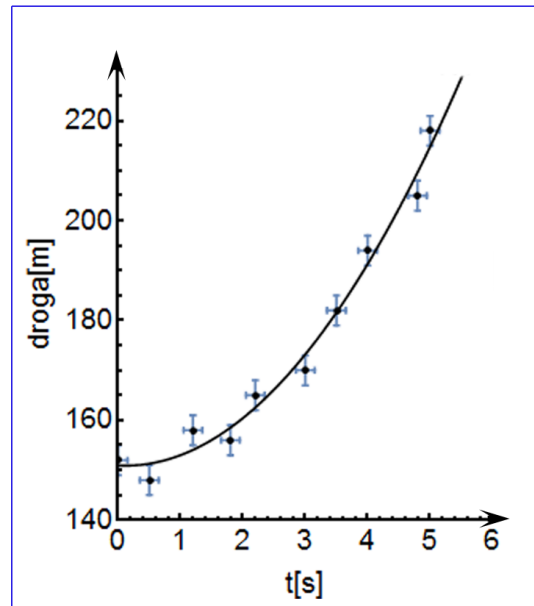
3. Rozmiar wykresu nie jest dowolny i nie powinien wynikać z tego, że dysponujemy takim, a nie innym kawałkiem papieru (na rys.2 arkusz papieru milimetrowego zaznaczony jest kolorem niebieskim). Rozmiar powinien być określony przez niepewności pomiarowe tych wielkości, które odkłada się na osiach. Niepewność ta powinna w wybranej skali być odcinkiem o łatwo zauważalnej, znaczącej długości.
4. Następnie prowadzimy odpowiednią krzywą (nie może to być linia łamana!) tak, by przecinała w miarę możliwości punkty pomiarowe, ale nie należy dążyć do tego, aby przechodziła ona przez wszystkie punkty, ponieważ każdy z nich obarczony jest niepewnością. W przypadku dużych rozrzutów staramy się, by ilość punktów poniżej i powyżej krzywej była zbliżona - w ten sposób uśredniamy graficznie wyniki pomiarów. W przypadku zależności nieliniowych korzystamy z krzywików.
5. Każdy rysunek powinien być podpisany. Etykieta wykresu wyjaśnia, co rysunek zawiera, co reprezentują zaznaczone krzywe.

**PODSUMOWANIE:**





**zły wykres**



**dobry wykres**

Rys.2