

ZJAWISKO PIEZOLEKTRYCZNE. WYZNACZANIE MODUŁÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH

1. Podstawy fizyczne

Ćwiczenie to ma na celu zapoznanie się ze zjawiskiem piezoelektrycznym oraz własnościami piezoelektryków i ich wykorzystaniu w technice.

1.1. Przypomnienie podstawowych wiadomości

1. **Odształcenie** - oznaczane najczęściej literą S (ang. strain - odkształcenie).

$$S = \frac{\Delta l}{l}$$

(a)

Jest to względna zmiana długości lub ogólniej, jest to względna zmiana wzajemnego położenia punktów materialnych ciała stałego.

2. **Naprężenie** - oznaczane najczęściej literami σ lub T (ang. tensile - rozciągający) - równe jest sile rozciągającej, działającej prostopadle do powierzchni A , na jednostkę tej powierzchni:

$$T = \frac{F}{A} \quad \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

(b)

3. **Prawo Hooke'a** - odkształcenie sprężyste jest proporcjonalne do naprężenia:

$$S = \frac{1}{Y} T$$

(c)

gdzie Y jest stałą zwaną **modułem Younga** - modułem sprężystości.

Zależność (c) można zapisać jako:

$$T = YS,$$

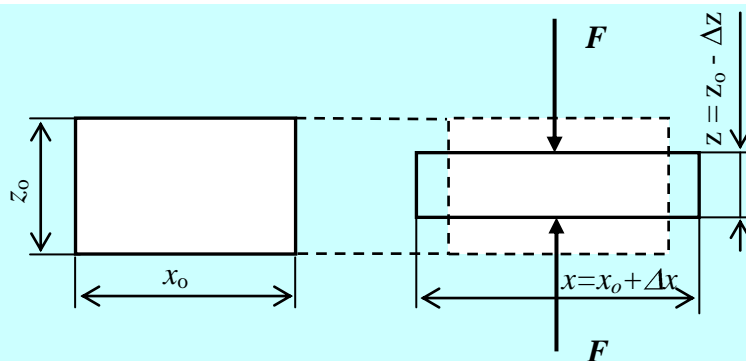
(d)

co oznacza, że **przyłożone naprężenie jest proporcjonalne do spowodowanego odkształcenia.**

5. **Współczynnik Poissona γ** - stała materiałowa określająca zwężenie przekroju poprzecznego ciała rozciąganego siłami podłużnymi. Jest ona równa stosunkowi względnego odkształcenia poprzecznego do jego względnego odkształcenia podłużnego (kierunek podłużny = kierunek działania siły F) - patrz rys. 1.

$$\gamma = \frac{-\frac{\Delta x}{x_0}}{\frac{\Delta z}{z_0}}$$

(e)



Rys. 1. Ilustracja definicji współczynnika Poissona.

6. Natężenie pola elektrycznego E między okładkami kondensatora płaskiego:

$$E = \frac{U}{l} \left[\frac{V}{m} \right]$$

(f)

U - napięcie między okładkami kondensatora, l - odległość między tymi okładkami.

7. Natężenie pola elektrycznego między okładkami kondensatora wyrażone przez gęstość powierzchniową ładunków σ :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

(g)

gdzie: $\sigma = \frac{q}{A} \left[\frac{C}{m^2} \right]$ (q - ładunek, A - powierzchnia), $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m] - przenikalność

dielektryczna próżni. $\varepsilon = \frac{C}{C_0}$ - jest to względna stała dielektryczna równa stosunkowi pojemności kondensatora z dielektrykiem C i bez dielektryka C_0 .

1.2. Materia w polu elektrycznym.

1. **Przewodnikami** nazywamy ciała, w których po przyłożeniu pola elektrycznego następuje ukierunkowanie przemieszczenia (ruch) swobodnych ładunków elektrycznych (ładunki ujemne: elektrony, aniony; ładunki dodatnie: kationy, dziury w półprzewodnikach).

2. **Dielektrykami** nazywamy ciała, w których na skutek braku elektrycznych ładunków swobodnych może być wytworzone i utrzymywane bez strat pole elektryczne (dielektryk idealny). Ponieważ w dielektrykach istnieją nieznaczne ilości ładunków swobodnych, przyjmuje się umownie za dielektryki (izolatory) uważać te substancje, których rezystywność w temperaturze pokojowej jest większa od $\rho = 10^8 \Omega m$. Dielektryk umieszczony w polu elektrycznym ulega polaryzacji.

3. **Polaryzacja elektryczna** lub polaryzacja dielektryczna jest to zjawisko powstawania własnego makroskopowego pola elektrycznego w dielektryku, wywołanego zewnętrznym polem elektrycznym. Związane jest ono z mikroprzesunięciami ładunków w obszarze atomów lub cząsteczek wchodzących w skład dielektryka. W wyniku tych mikroprzesunięć ładunku związanego, na przeciwnych powierzchniach prostopadłościannu tego ciała (np. ciała w kształcie płyty umieszczonej prostopadle do linii sił pola elektrycznego) powstaje ładunek związany, którego gęstość powierzchniowa (z definicji) równa jest modułowi wektora polaryzacji P , czyli $P =$

$\frac{q}{A} \left[\frac{C}{m^2} \right]$. Ładunki te, zwane polaryzacyjnymi, wytwarzają własne makroskopowe pole elektryczne, skierowane przeciwnie do pola zewnętrznego.

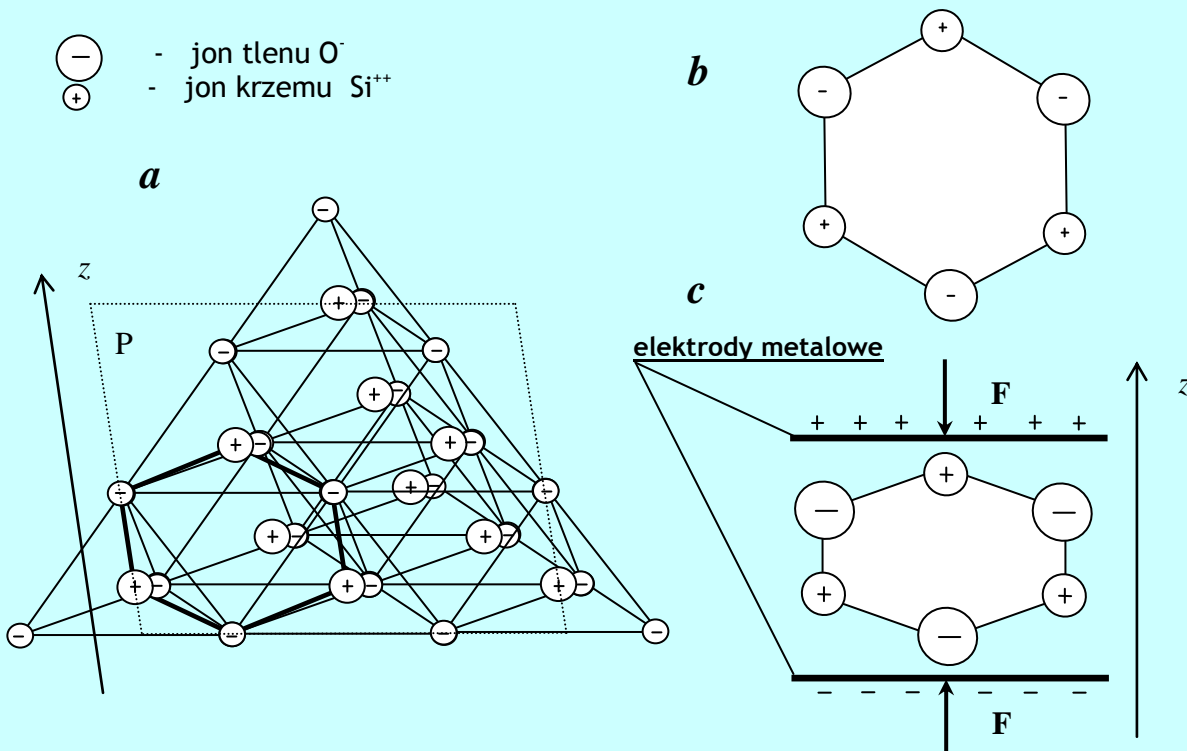
1.3. Zjawisko piezoelektryczne czyli polaryzacja dielektryczna wywołana ciśnieniem

W 1880 roku Jakub i Piotr Curie w czasie doświadczeń z płytkami wyciętymi z kryształu kwarcu zauważyli, że wywieranie nacisku (piezo-ciśnienie) w pewnych kierunkach krystalograficznych tego kryształu powoduje pojawienie się na jego powierzchniach ładunku proporcjonalnego do wielkości przyłożonego ciśnienia - czyli płytka tego kryształu ulega polaryzacji P , proporcjonalnej do przyłożonego ciśnienia T (patrz rys.2.):

$$P = d \cdot T$$

(1)

Polaryzacja P zmienia znak przy zmianie znaku naprężenia (rozciąganie ma znak „+”, ściskanie „-”). Materiały, w których powstają ładunki elektryczne (i polaryzacja P) wywołane działaniem ciśnieniem, zostały nazwane **piezoelektrykami**, a zjawisko fizyczne - **zjawiskiem piezoelektrycznym prostym**. Jego mechanizm dla kwarcu wyjaśnia poglądowo rys.2.



**Rys.2. a - Struktura kryształu kwarcu SiO_2 z wyróżnioną płaszczyzną P .
b - niezdeformowany sześciokąt, wyróżniony na płaszczyźnie P .
c - Zdeformowany wzdłuż osi x sześciokąt wraz z ładunkiem indukowanym na metalowych elektrodach naparowanych na powierzchniach kryształu, prostopadłych do płaszczyzny P .**

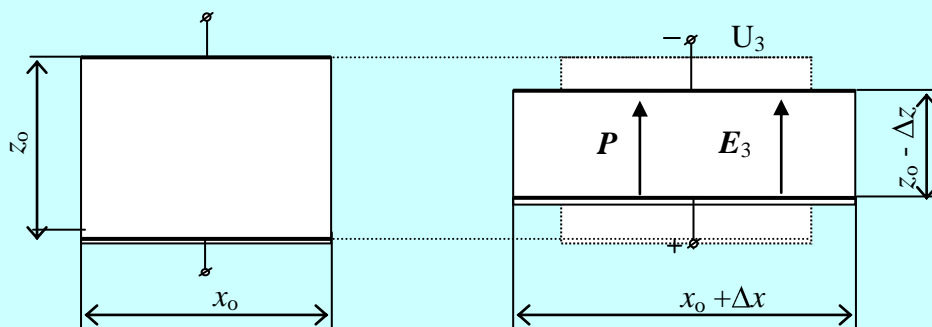
Kwarc (SiO_2) ma komórkę elementarną złożoną z trzech atomów krzemu (elektrycznie dodatnich - kwarc posiada znaczny udział wiązania jonowego) i sześciu atomów tlenu (elektrycznie ujemnych). Na płaszczyźnie P przecięcia kryształu można wyróżnić sześciokąty składające się z trzech atomów krzemu i trzech atomów tlenu uwidocznionych na rys.2b i 2c. Jeżeli przykładając siłę F kryształ ściśniemy wzdłuż osi x , leżącej w płaszczyźnie P , wówczas atom krzemu przesunie się między atomy tlenu, a atom tlenu między atomy krzemu. Wytwarza się więc moment dipolowy, który indukuje na metalizowanych powierzchniach kryształu ładunek o znaku pokazanym na rys. 2c.

W 1881 roku G. Lippmann teoretycznie przewidział, że napięcie elektryczne przyłożone do niektórych powierzchni kryształu kwarcu powinno wywołać mechaniczną deformację

(odkształcenie) lub mechaniczne naprężenie (patrz rys.3). Bracia Jakub i Piotr Curie w tym samym roku potwierdzili eksperymentalnie hipotezę Lippmanna, mianowicie liniową zależność odkształcenia S od pola elektrycznego E :

$$S = d \cdot E \quad (2)$$

Okazało się, że współczynnik proporcjonalności wynosi także d , tak jak we wzorze (1). Zmiana kierunku pola elektrycznego E zmienia znak odkształcenia S (wydłużenie ma znak „+”, kurczenie „-”).



Rys.3. Efekt piezoelektryczny odwrotny. U - napięcie przyłożone do elektrod, P i E - wektory polaryzacji i natężenia pola elektrycznego. Δx i Δz - zmiany wymiarów kryształu, wywołane przyłożeniem pola elektrycznego.

Polaryzację elektryczną wywołaną mechanicznym naprężeniem nazywa się prostym zjawiskiem piezoelektrycznym - wzór (1), a odkształcenie ciała pod wpływem przyłożonego napięcia elektrycznego (pola E) - **odwrotnym zjawiskiem piezoelektrycznym** - wzór (2).

Z zależności (1) i (2) zjawisko piezoelektryczne proste i odwrotne można przedstawić równaniem:

$$\frac{P}{T} = \frac{S}{E} = d = \frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{\Delta S}{\Delta E}, \quad (3)$$

gdzie Δ oznaczają odpowiednie przyrosty; natomiast d jest modułem piezoelektrycznym lub współczynnikiem piezoelektrycznym i jest określony przez przyrost grubości (długości) Δl na jednostkę napięcia U :

$$d = \frac{S}{E} = \frac{\Delta l}{U} = \frac{\Delta l}{U} \left[\frac{m}{V} \right]; \quad d = \frac{P}{T} \quad d = \frac{P}{T} \quad \left[\frac{Cm^2}{m^2N} \right] = \left[\frac{Cm}{J} \right] = \left[\frac{Cm}{CV} \right] = \left[\frac{m}{V} \right] \quad (4)$$

W ogólnym przypadku moduły piezoelektryczne d tworzą tensor trzeciego rzędu d_{ijk} . Naprężenie T oraz odkształcenie S tworzą symetryczne tensory drugiego rzędu T_{ij} i S_{ij} . W zapisie macierzowym liczba równań i członów w równaniach zmniejsza się znacznie, a dla wybranych kierunków może zredukować się do dwóch modułów d_{33} i d_{31} .

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawisk piezoelektrycznych prostego i odwrotnego oraz wyznaczenie wartości odpowiednich modułów piezoelektrycznych dla obu zjawisk.

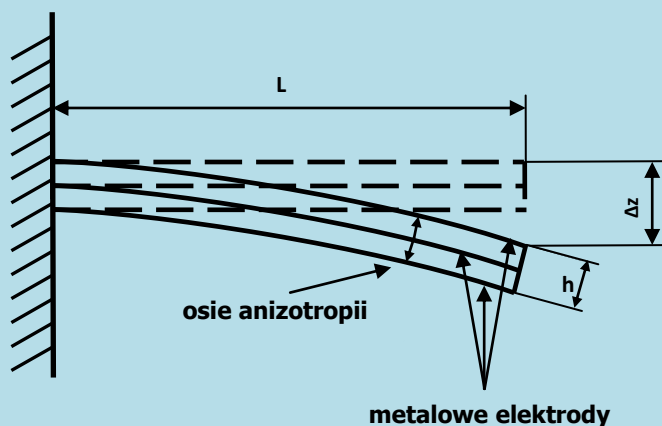
1.4. Wyznaczanie modułu piezoelektrycznego w odwrotnym zjawisku piezoelektrycznym.

Zjawisko piezoelektryczne odwrotne przedstawione jest na rys.3. Kierunek polaryzacji P w umowie międzynarodowej jest zgodny z kierunkiem osi 3 (tj. z). Jeśli do płytki ceramiki piezoelektrycznej podłączymy napięcie U_3 , wówczas jej długość z ulegnie skróceniu lub wydłużeniu o Δz .

Ponieważ Δz jest bardzo małe (rzędu 10^{-9} m/V), to do jego pomiaru należy posługiwać się bardzo czułymi urządzeniami lub stosować bardzo duże napięcia (co najmniej kV). Przez

dziesięciolecia stosowano dylatometry mechaniczne (urządzenia do pomiaru zmian długości), o dokładności nie lepszej niż $1 \mu\text{m}$. Obecnie do detekcji takich małych zmian wymiarów coraz częściej wykorzystuje się metody optyczne wykorzystujące zjawisko interferencji światła.

Efekt piezoelektryczny odwrotny występuje w zasadzie we wszystkich materiałach, które nie posiadają środka symetrii. W technice bardzo często jest to ceramika PZT (tytaniań cyrkonowo-olowiowy) o własnościach ferroelektrycznych, do której, w temperaturze bliskiej punktu Curie, przykłada się silne pole elektryczne, a następnie ochładza, co powoduje „zamrożenie” struktury anizotropowej z osią symetrii wzdłuż tego pola. Ponieważ efekt piezoelektryczny odwrotny jest bardzo mały, do jego detekcji, a także w zastosowaniach praktycznych, stosuje się konstrukcję zwana **bimorfem** (dwupłytką), która pozwala radykalnie zwiększyć przesunięcie z nim związane. Budowę bimorfu pokazano na rys. 4. Są to dwie płytki o wymiarach spełniających warunek $L \gg w \gg h$ (długość, szerokość, grubość) połączone razem. Ich osie anizotropii, wzdłuż których przykłada się pole elektryczne, mają przeciwne zwroty i są prostopadłe do największych ścian płytek, na których są napyłone elektrody metalowe. Jeśli rezystancje obu płytek są w przybliżeniu takie same, to przyłożone napięcie zewnętrzne odkładające się po połowie na jednej i na drugiej płytce, powoduje odkształcenie płytek w kierunku prostopadłym do przyłożonego pola. Ponieważ zwroty osi anizotropii płytek są przeciwne, jedna płytka się rozszerza a druga kurczy. Jeżeli więc grubość płytek jest bardzo mała, a połączenie między nimi jest sztywne, daje to w efekcie wygięcie całego układu, a efekt przesunięcia końca bimorfu względem drugiego końca, który jest zamocowany, jest znacznie większy.



Rys.4. Zachowanie bimorfu po przyłożeniu pola elektrycznego (linia przerywana - bimorf bez napięcia, linia ciągła - wygięcie po wpływem pola elektrycznego)

Dokładna analiza naprężeń w bimorfie poddanym działaniu pola elektrycznego wymaga uwzględnienia naprężeń ściskających jak i ścinających (na granicy płytek) i rozwiązania układu równań dla momentów sił i naprężeń. Wobec znacznej złożoności tych obliczeń, nie będą one tu przytaczane. Zależność przesunięcia końca bimorfu od wymiarów geometrycznych oraz przyłożonego pola jest następująca (przy pominięciu naprężeń ścinających):

$$\Delta z = \frac{3d_{13}UL^2}{2h^2},$$

(5)

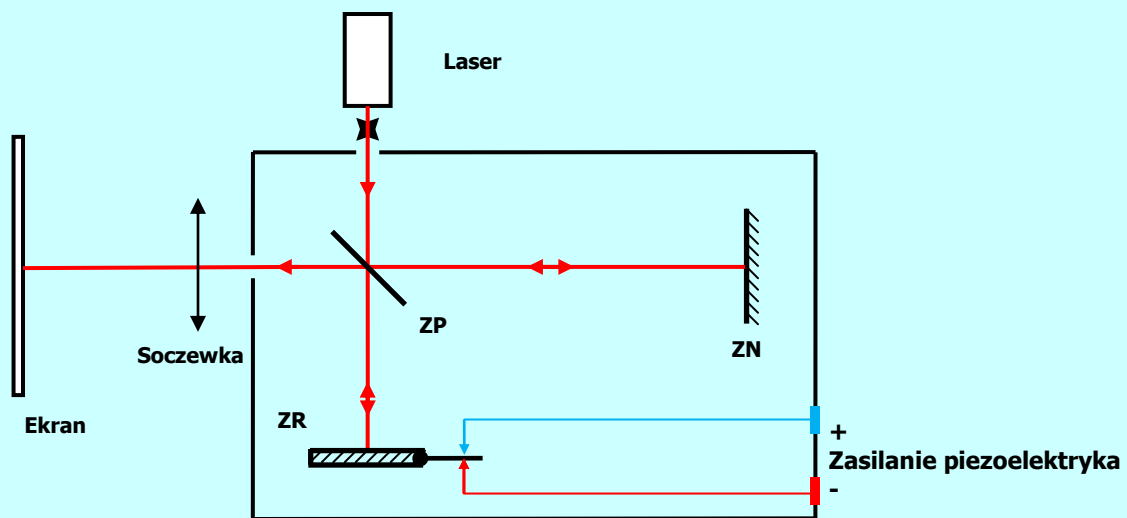
gdzie:

- U - przyłożone napięcie
- h - grubość całkowita bimorfu
- L - długość bimorfu
- d_{13} - moduł piezoelektryczny

W laboratorium zastosowano interferometr Michelsona, w którym jedno ze zwierciadeł (małe lustro) jest przyklejone do piezoelektryka, a zmiana wielkości Δz określana jest na podstawie zliczania liczby przesuujących się prążków interferencyjnych. Szczegółowe informacje o zasadzie działania interferometru Michelsona zawiera instrukcja do ćwiczenia 25.

Układ pomiarowy przedstawiono na rys.5. Światło z lasera pada na dzielnik wiązki - półprzepuszczalne lustro które dzieli wiązkę na dwie. Jedna pada na zwierciadło nieruchome, po odbiciu od którego i przejściu przez dzielnik stanowi wiązkę odniesienia. Druga wiązka odbija się od lusterka umocowanego na końcu bimorfu, którego koniec wychyla się proporcjonalnie do napięcia przyłożonego do bimorfu. Obie wiązki padają na soczewkę, która obrazuje powierzchnię lusterka na ekranie. Umożliwia to pominięcie wpływu nachylenia lusterka, które jednocześnie przesuwają się i przechyla, a miarę efektu stanowi tylko przesunięcie końca bimorfu.

Na ekranie obie wiązki nakładają się i otrzymujemy prążki interferencyjne. Jeżeli koniec bimorfu przesuwają się, droga optyczna jednej z wiązek ulega zmianie. Ponieważ światło pokonuje drogę dwa razy (do lustra i z powrotem), przesunięciu o jeden prążek odpowiada przesunięcie końca bimorfu o $\lambda/2$. Stąd też licząc prążki w pewnym punkcie na ekranie można wyznaczyć przesunięcie końca bimorfu. Pomiar zależności przesunięcia od napięcia umożliwi wyznaczenie modułu piezoelektrycznego zgodnie ze wzorem (5).



Rys.4. Schemat budowy układu obserwacji zjawiska piezoelektrycznego odwrotnego z wykorzystaniem interferometru Michelsona; ZP - zwierciadło półprzepuszczalne; ZN - zwierciadło odbijające nieruchome ZR - zwierciadło odbijające ruchome naklezione na piezoelektryku (bimorfie)

1.5. Zastosowania piezoelektryków

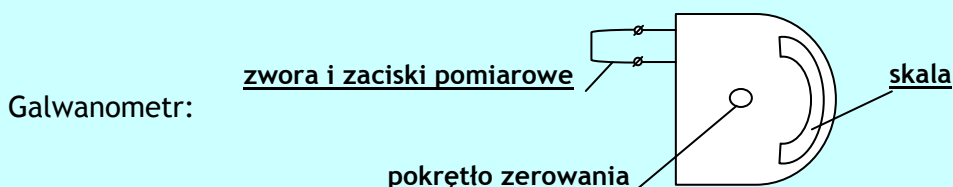
Zastosowania zjawiska piezoelektrycznego można podzielić na kilka grup.

1. Do pierwszej zaliczamy zastosowania piezoelektryków jako rezonatorów w generatorach i stabilizatorach częstotliwości. Te zastosowania zapewniają wysoka dobroć piezoelementów. Wymagana dobroć stosowanych rezonatorów zawiera się w przedziale $10^3 - 10^8$.
2. Druga grupa zastosowań, to użycie ich w charakterze przetworników drgań zarówno nadawczych jak i odbiorczych. Wymagane zazwyczaj szerokie pasmo przetwarzanych częstotliwości osiągamy przez podwyższanie tłumienia (obniżanie dobroci). Techniczne przyrządy z tej grupy zastosowań, to ultrasonografy, defektoskopy, echosondy, (sonary) i.t.p.
3. Kolejna grupa zastosowań, bardzo szybko rozwijająca się, to zastosowania w mikrorobotyce jako mikrośiłowniki do napędzania mikromaszyn, mikrozaworów, do pozycjonowania mikroelementów (mikrozwierciadła w rzutnikach, elektrody w mikroskopach tunelowych i sił atomowych i wielu, wielu innych).
4. Do kolejnej grupy można zaliczyć urządzenia, w których wykorzystuje się fizyczne działanie wytworzonych piezoelektrycznie drgań i fal. Do grupy tej zaliczamy także przyrządy takie jak:

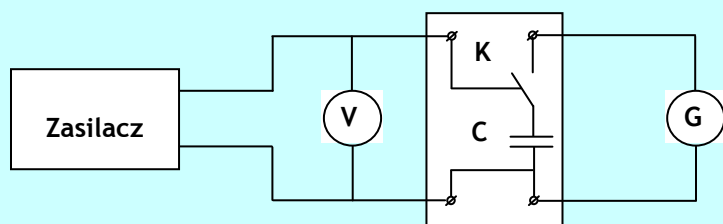
drażarki ultradźwiękowe, myjki, atomizery (rozpylacze cieczy) itp. W tej grupie zastosowań z przyrządami opartymi na piezoelektryczności rywalizują przyrządy oparte na zjawisku magnetostrykcji, lecz z reguły mają one większy ciężar i rozmiary.

2. Wykonanie ćwiczenia

2.1. Wyznaczenie stałej balistycznej galwanometru.



Połączyć układ pomiarowy według poniższego schematu.



Rys. 4. Schemat pomiarowy do wyznaczenia stałej balistycznej galwanometru G .

Do wyznaczenia modułu piezoelektrycznego wykorzystuje się galwanometr balistyczny, czyli urządzenie, które służy do pomiarów przepływającego ładunku (jest to właściwie amperomierz do pomiarów bardzo małych prądów). Podstawowym parametrem opisującym działanie galwanometru jest stała balistyczna b , która jest współczynnikiem proporcjonalności między wskazaniem galwanometru a wartością przepływającego ładunku. Stała balistyczna zależy tylko od parametrów konstrukcyjnych galwanometru. Szczegółowy opis działania galwanometru i wyprowadzenie wzoru na stałą balistyczną znajduje się w Dodatku 1.

Stają b dla danego galwanometru można wyznaczyć, jeżeli znamy pierwsze wychylenie wywołane przez przepływ znanego ładunku. Realizuje się to przez **ładowanie kondensatora o znanej pojemności, znanym napięciem** ($Q = CU$) a następnie rozładowanie go przez galwanometr.

Większą dokładność, niż przy pojedynczym pomiarze, osiąga się przez pomiar zależności wychylenia wskaźnika w funkcji przepływającego ładunku, skąd stałą balistyczną oblicza się ze współczynnika kierunkowego prostej (np. przy użyciu metody najmniejszych kwadratów).

Podczas wykonywania połączeń nie wolno usuwać zwory galwanometru. Usunąć ją można dopiero po sprawdzeniu prawidłowości połączeń układu pomiarowego przez asystenta.

Napięcie zasilania należy zmieniać co 1 V odczytując jego wartość przy użyciu woltomierza napięcia stałego. Maksymalną wartością ustawianego napięcia będzie wartość, przy której plamka świetlna galwanometru wychyli się do końca skali. Znając pojemność kondensatora C (w faradach) obliczyć ładunek zgromadzony na jego okładkach dla każdego napięcia. Zależność ładunku od wychylenia wskaźnika umieścić w tabeli wyników. Po zmianie polaryzacji napięcia na przeciwną wykonać pomiary ponownie. Wskaźnik skali będzie wychylał się w przeciwną stronę. Przyjąć za

dotąd wychylenie wskaźnika w prawo, odpowiadające temu przypadkowi napięcie przyjąć także za dodatnie. Przeciwnie wychylenia i odpowiadające temu napięcie przyjąć za ujemne. Za pomocą metody najmniejszych kwadratów obliczyć stałą balistyczną galwanometru b , (w kulombach na działkę).

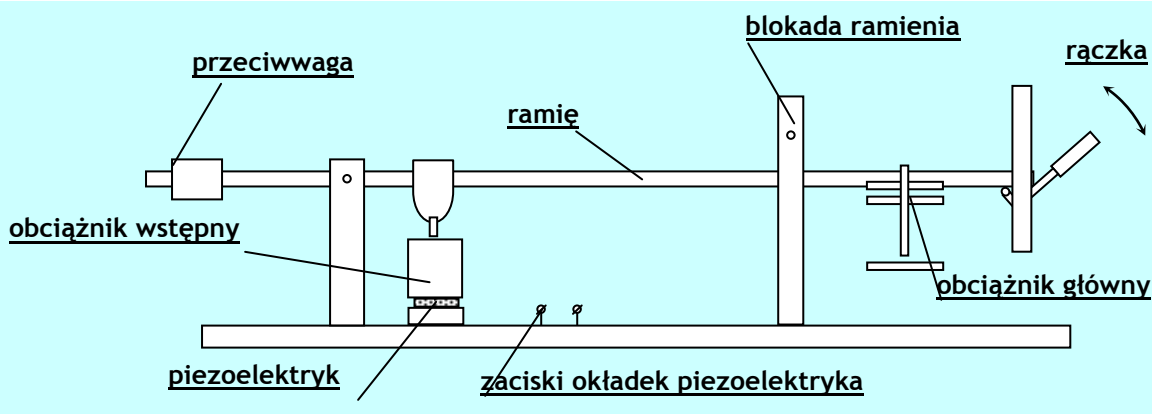
Tabela wyników.

Lp	Napięcie [V]	Ładunek [C]	Wychylenie [dz]

2.2. Pomiar modułu piezoelektrycznego d w zjawisku piezoelektrycznym prostym

Badany piezoelektryk w kształcie krążka umieszczony jest w układzie mechanicznym przedstawionym na rysunku 5.

Metalizowane powierzchnie krążka wyprowadzone są do zacisków zamontowanych na podstawie układu mechanicznego. Zaciski te połączyć z galwanometrem. Piezoelektryczny krążek znajduje się pod pewnym obciążeniem wstępnym, które stanowi mosiężny klocek. Dodatkowe zmiany obciążenia realizuje się za pomocą ramienia dźwigni jednostronnej przez dodawanie i odejmowanie ciężarków przy końcu dłuższego ramienia dźwigni (obciążnik główny). Zmiany obciążenia należy dokonywać przy podniesionym ramieniu dźwigni. Pomiary wykonać zarówno podczas opuszczania dźwigni, jak i podczas jej podnoszenia.



Rys.5. Układ do pomiaru efektu piezoelektrycznego prostego.

Moduł piezoelektryczny d wyznaczyć z zależności $\Delta q = d_{33} \cdot \Delta F$, która przedstawia linię prostą. Zmiany ΔF realizujemy przez opisane dokładanie i zdejmowanie ciężarków.

(Uwaga - zmierzyć stosunek ramion dźwigni!).

Odpowiadające zmianom ΔF wartości ładunku Δq mierzyć wykorzystując do tego celu galwanometr balistyczny.

1. Sprawdzić wyważenie dźwigni (ciężarki zdjęte).
2. Sprawdzić, czy świeci się plamka galwanometru (G) .
3. Rozewrzeć galwanometr wyjmując jedną wtyczkę zwory, nie ruszając pozostałych połączeń.
4. Wyregulować (jeśli zachodzi potrzeba) położenie zerowe plamki galwanometru.
5. Zwolnić docisk piezoelementu przesuwając rączkę do dołu (eliminując nacisk).
6. Nałożyć na pręt jeden ciężarek.
7. Przemieszczając rączkę blokady w położenie górne odczytać maksymalne wychylenie plamki galwanometru przy wahnięciu w prawo α_p .
8. Przemieszczając rączkę dźwigni w położenie dolne odczytać maksymalne wychylenie plamki galwanometru w stronę lewą α_l .

9. Zaczynając od położenia rączki blokady - jak w punkcie 5 (do dołu), dokładać następane obciążniki i powtórzyć czynności, aż do wyczerpania zakresu pomiarowego.
10. Po zakończeniu pomiarów zewrzeć galwanometr zwoją.

Tabela wyników.

Lp	Obciążenie m [kg]	Siła nacisku F [N]	Wychylenie [dz]	Ładunek [C]

2.3. Pomiar modułu piezoelektrycznego w zjawisku piezoelektrycznym odwrotnym

1. Włączyć zasilacz lasera i zasilacz napięcia przykładanego do bimorfu. Na ekranie powinny pojawić się prążki interferencyjne.
2. Na kartce przypiętej do ekranu narysować długopisem poziomą linię przechodzącą przez obraz interferencyjny (będzie ona służyć do obserwacji „przechodzenia” kolejnych prążków).
3. Zmieniać powoli napięcie zasilające obserwując jednocześnie obraz na ekranie. Gdy nastąpi przesunięcie obrazu o jeden prążek, zapisać wartość napięcia.
4. Przesuwać obraz o kolejne prążki zapisując każdorazowo napięcie.
5. Zmienić polaryzację zasilania (zamienić podłączenie przewodów w zasilaczu!) i ponownie wykonać pomiary.

3. Obliczenia

3.1. Wyznaczenie stałej balistycznej galwanometru.

1. Określić niepewności pomiaru ładunku i wychylenia. Wykonać wykres zależności ładunku przepływającego przez galwanometr od wychylenia.
2. Metodą najmniejszych kwadratów obliczyć współczynnik kierunkowy i jego niepewność. Na podstawie testu χ^2 sprawdzić, czy otrzymana zależność jest liniowa.
3. Obliczyć niepewność typu B stałej balistycznej i porównać ją z niepewnością typu A.
4. Zapisać prawidłowo wynik pomiarów.

3.2. Wyznaczenie modułu piezoelektrycznego *d* w zjawisku piezoelektrycznym prostym.

1. Określić niepewności pomiarów ładunku i siły.
2. Wykonać wykres zależności Q od F korzystając z obliczonej uprzednio stałej balistycznej galwanometru.
3. Metodą najmniejszych kwadratów obliczyć d_{33} oraz $u(d_{33})$. Na podstawie testu χ^2 sprawdzić, czy otrzymana zależność jest liniowa.
4. Obliczyć niepewność typu B i porównać z niepewnością typu A.
5. Zapisać prawidłowo wynik pomiarów.

3.3. Wyznaczenie modułu piezoelektrycznego *d* w zjawisku piezoelektrycznym odwrotnym.

1. Określić niepewności pomiarów napięcia.
2. Na podstawie wzoru (5) wykreślić właściwą zależność ta , aby współczynnikiem kierunkowym otrzymanej prostej był poszukiwany moduł piezoelektryczny.
3. Metodą najmniejszych kwadratów obliczyć d oraz $u(d)$. Na podstawie testu χ^2 sprawdzić, czy otrzymana zależność jest liniowa.
4. Obliczyć niepewność typu B i porównać z niepewnością typu A.
5. Zapisać prawidłowo wynik pomiarów.

4. Pytania kontrolne

1. Czy tylko pole elektryczne może spolaryzować dielektryk ?
2. Czy piezoelektrykiem może być ciało posiadające środek symetrii komórki elementarnej?
3. Czy piezoelektrykiem może być ciało o koncentracji ładunków swobodnych porównywalnej z koncentracją ładunku metalu (np. aluminium)?
4. Opisać mechanizm zjawiska piezoelektrycznego prostego.
5. Co to są bimorfy?
6. Podać definicję modułu Younga.

5. Literatura

Krajewski T. „Zagadnienia fizyki dielektryków”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1970

DODATEK 1

Zasada działania galwanometru balistycznego

Galwanometr jest amperomierzem do pomiarów prądu o bardzo małej wartości. Przepływ bardzo małych prądów (10^{-6} do 10^{-12} A) jest równoważny z przepływem względnie niedużej ilości ładunku elektrycznego, dlatego też bardzo często mówi się, że galwanometry to przyrządy do pomiaru przepływającego ładunku.

Zasada działania galwanometru opiera się na zjawisku powstawania momentu siły działającego na obwód z prądem, który znajduje się w polu magnetycznym. Obwodem jest w galwanometrze cewka, prąd tworzy przepływający ładunek, a pole magnetyczne jest wytwarzane przez magnes stały. Udowodnimy, że pierwsze wychylenie cewki galwanometru jest proporcjonalne do ładunku, który przez nią przepłynął. Wiadomo z mechaniki, że **równanie momentów sił (II zasada dynamiki Newtona dla bryły sztywnej) dla cewki galwanometru (ramki) ma postać:**

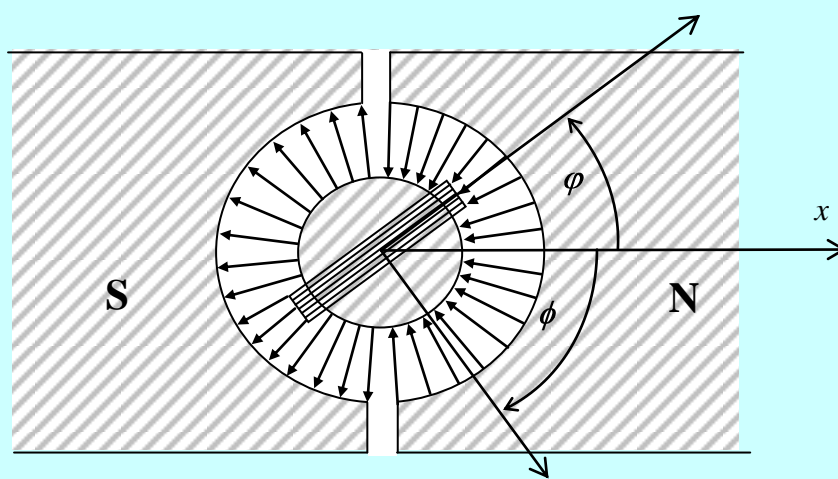
$$I \frac{d\omega}{dt} = I \frac{d^2\phi}{dt^2} = M_Z - r \frac{d\phi}{dt} - D\phi \quad (D1)$$

M_Z - oznacza tu moment sił zewnętrznych na działających na cewkę, $r \frac{d\phi}{dt}$ jest momentem sił tarcia, $D\phi$ - oznacza sprężysty moment zwrotny zawieszenia cewki. Wartość momentu sił zewnętrznych działających na ramkę wyraża się wzorem:

$$M_Z = Ni SB \sin \phi \quad (D2)$$

gdzie i - natężenie prądu, S - powierzchnia ramki, N - ilość zwojów, B - wartość indukcji magnetycznej działającej na ramkę, ϕ - kąt pomiędzy normalną do płaszczyzny ramki a kierunkiem wektora B (rys. 4)

Zależność momentu M_Z od kąta ϕ znika, jeśli się rozważy układ linii B w galwanometrze (patrz rys. D1).



Rys. D1. Zasada działania galwanometru balistycznego.

Jeżeli czas przepływu prądu przez galwanometr t jest dużo mniejszy od czasu pełnego wychylenia (skręcenia) cewki galwanometru ($t \ll T_0/4$), to ramka w tym czasie praktycznie nie zdąży jeszcze wyjść z położenia równowagi i można przyjąć, że $D\phi = 0$. Przy małym tarcu ($r \frac{d\phi}{dt} \approx 0$) równanie (D1) upraszcza się do postaci:

$$I \frac{d\omega}{dt} = Ni SB$$

(D3)

Stąd otrzymujemy:

$$I\omega = NSB \int_0^t i dt = NSB q$$

(D4)

gdzie q jest ładunkiem, który przepłynął przez cewkę.

Z drugiej strony wiemy, że uzyskana energia ruchu obrotowego cewki musi być równa energii sprężystej zawieszenia po zatrzymaniu, czyli:

$$\frac{I\omega^2}{2} = \frac{D\alpha_o^2}{2}$$

(D5)

Wyliczając ω z równania (D4) i wstawiając do (D5) otrzymujemy:

$$q^2 = \frac{DI}{N^2 S^2 B^2} \alpha_o^2$$

(D6)

Wszystkie parametry charakteryzujące cewkę i galwanometr tj. N , S , I , D i B są dodatnie i stałe, stąd prosta zależność: $q = b \cdot \alpha_o$, która stwierdza proporcjonalność pierwszego wychylenia do ładunku, który przepłynął przez uzwojenie cewki galwanometru (w impulsie). Parametr b - nosi nazwę stałej balistycznej galwanometru.