

Laboratorium Półprzewodniki, Dielektryki i Magnetyki

Ćwiczenie 3

Pomiary i wyznaczenie parametrów ceramiki piezoelektrycznej

dr inż. Tomasz Piasecki (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Prosty i odwrotny efekt piezoelektryczny i układ równań opisujący te efekty wraz z jednostkami zmiennych i parametrów materiałowych
2. Zależność pojemności piezoelektryka od częstotliwości
3. Warunki i metody wytworzenia trwałej polaryzacji elektrycznej ceramiki piezoelektrycznej
4. Metody pomiaru materiałów piezoelektrycznych
5. Metody wyznaczenia parametrów piezoelektryka: ϵ , d , g

Spis treści

1	Wstęp	1
1.1	Opis zjawisk piezoelektrycznych	1
1.2	Równania elektromechaniki	2
1.3	Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego	3
2	Program ćwiczenia	4
2.1	Pomiar i wyznaczenie modułu piezoelektrycznego d metodą statyczną	4
2.2	Pomiar współczynnika sprzężenia elektromechanicznego na podstawie pomiaru pojemności	5
2.3	Wyznaczenie stałej napięciowej i parametrów mechanicznych piezoelektryka	5



Katedra
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

Zjawisko piezoelektryczności zostało odkryte w 1880 r. przez Pierre'a i Piotra Curie. Do piezoelektryków należą do niektóre materiały krystaliczne, polimerowe i ceramiczne.

W przypadku materiałów krystalicznych, kryształy piezoelektryczne są układami nie posiadającymi środka symetrii. Wiele materiałów organicznych wykazuje efekt piezoelektryczny. Może on być obserwowany w niektórych gatunkach drewna, jedwabiu i ścięgnach zwierzęcych. Efekt występujący w materiałach pochodzenia naturalnego jest jednak bardzo słaby, w przeciwieństwie do niektórych tworzyw sztucznych, a zwłaszcza syntetycznych polimerów. Duże znaczenie praktyczne mają cienkie folie tych materiałów, które mogą być prasowane w postaci stosów piezoelektrycznych. Efekt piezoelektryczny polimerów ulega zwiększeniu w wyniku przeprowadzenia dodatkowych zabiegów, do których należy wyciąganie folii w podwyższonej temperaturze i w dużym polu elektrycznym, jak również domieszkowanie tworzywa sztucznego ceramiką piezoelektryczną.

Ceramiki piezoelektryczne są natomiast obecnie jednym z najszerzej stosowanych w technice materiałów piezoelektrycznych. Szeroki zakres praktycznych zastosowań materiałów piezoceramicznych oprócz tego, że jest związany z właściwościami ceramik, tj. głównie z silnym efektem piezoelektrycznym i w niektórych przypadkach z dużą wartością stałej dielektrycznej, wynika z łatwej i prostej technologii, która może być z powodzeniem stosowana w wielkoseryjnej produkcji.

Najbardziej znanym piezoelektrykiem jest kryształ kwarcu, jednakże niektóre związki, jak np. BaTiO_3 lub PbZrTiO_6 , wykazują ten efekt w znacznie większym stopniu (50 – 100 razy).

Piezoelektryki wykorzystywane są w różnych dziedzinach nauki i techniki. Najbardziej popularne to zastosowania to:

- w elementach elektronicznych (filtry, rezonatory)
- transformatory piezoelektryczne
- w zapalarkach do gazu, zapalniczkach – uderzenie ciężarka rozpedzonego przez napiętą sprężynę a następnie zwolnioną przez zapadkę powoduje powstanie potencjału od kilku do kilkunastu kV i przeskok iskry elektrycznej,
- precyzyjne wagi analityczne, wagi domowe,
- sterowanie pomiarem w tzw. mikroskopach STM czy AFM,
- wkładki gramofonowe w popularnych gramofonach z lat 1950-1990, gdzie drgania igły gramofonowej przenoszone na kryształy piezoelektryka, powodując powstanie napięć i uzyskanie sygnału dźwiękowego,
- w sondach USG, które umożliwiają wytworzenie fali akustycznej i rejestrację ech, pochodzących od granic struktur o różnych wartościach impedancji akustycznych wzdłuż jednego kierunku.

1.1 Opis zjawisk piezoelektrycznych

Polaryzacja elektryczna w wielu materiałach może wywołać zmiany wymiarów nieliniowo zależne od polaryzacji, czyli efekt zwany elektrostrykcją. W niektórych dielektrykach, nazywanych piezoelektrykami, zachodzi zjawisko piezoelektryczne bądź też efekt piezoelektryczny prosty i odwrotny.

Efekt piezoelektryczny prosty to zjawisko fizyczne polegające na powstawaniu na przeciwnych ścianach kryształów ładunków elektrycznych przeciwnego znaku w wyniku deformacji kryształu.

Zjawisko to powstaje tylko w pewnych ciałach stałych, mających uporządkowaną budowę atomową i wykazujących właściwą symetrię tej budowy. Zjawisko piezoelektryczne może zaistnieć w materiałach wykazujących samoistną lub indukowaną polaryzację. Polaryzacja ta zmienia

się pod wpływem naprężeń mechanicznych T , które powodują powstanie indukcji elektrycznej:

$$D = d \cdot T \quad (1)$$

gdzie: D - indukcja elektryczna w $\frac{C}{m^2}$, T - naprężenia mechaniczne w Pa , d - moduł piezoelektryczny.

Efekt piezoelektryczny odwrotny to zjawisko polegające na zmianie wymiarów piezoelektryka pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego, który to efekt można opisać równaniem:

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

gdzie S - bezwymiarowe odkształcenie względne, E natężenie pola elektrycznego w $\frac{V}{m}$. Wynika stąd, że moduł piezoelektryczny d , nazywany również stałą ładunkową, można wyrazić na dwa sposoby:

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (3)$$

a jego jednostkami mogą być zarówno $\frac{C}{N}$ jak i $\frac{m}{V}$.¹

1.2 Równania elektromechaniki

Ponieważ i naprężenia i pole elektryczne mogą oddziaływać na materiał jednocześnie, powyższe zależności należy powiązać. Formułuje się równania stanu, nazywane podstawowymi równaniami elektromechaniki. Opisują one związki między elektrycznymi i elastycznymi zmiennymi ośrodka, występującymi przy określonych warunkach brzegowych:

$$D = \epsilon^T \cdot E + d \cdot T \quad (4a)$$

$$S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad (4b)$$

gdzie ϵ^T - przenikalność elektryczna dla stałych naprężeń w $\frac{F}{m}$, s^E - podatność mechaniczna przy stałym natężeniu pola elektrycznego, wyrażana w Pa^{-1} .

Równania stanu można wyrazić również dla innych zmiennych elastoelektrycznych:

$$S = s^D \cdot T + g_t \cdot D \quad (5a)$$

$$E = \beta^T \cdot D - g \cdot T \quad (5b)$$

$$T = c^E \cdot S + e_t \cdot E \quad (5c)$$

$$D = \epsilon^S \cdot E + e \cdot S \quad (5d)$$

$$T = c^D \cdot S - h_t \cdot D \quad (5e)$$

$$E = \beta^S \cdot D - h \cdot S \quad (5f)$$

W równaniach (4) - (5) występują:

- parametry mechaniczne materiałów takie jak moduł sprężystości c i jego odwrotność czyli podatność mechaniczna s , a indeks górny E lub D oznacza warunki brzegowe, w jakich zostały wyznaczone (przy stałym E lub D),
- parametry elektryczne, takie jak przenikalność elektryczna ϵ i jej odwrotność β , wyznaczone dla stałego T (nazywane wolnymi) lub S (nazywane obciążonymi),
- współczynniki piezoelektryczne d - moduł piezoelektryczny i jego odwrotność h , g - stała napięciowa i jej odwrotność e .²

¹Wykaż samodzielnie, że istnieje równoważność pomiędzy tymi jednostkami.

²Zastanów się, jakie jednostki będą miały parametry występujące w równaniach (5).

1.3 Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego

Ważnym parametrem opisującym materiał piezoelektryczny jest współczynnik sprzężenia elektromechanicznego k . Jest on bezwymiarową miarą stopnia przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną i odwrotnie w piezoelektryku. Można go określić na podstawie stosunku wewnętrznej energii elektromechanicznej W_{EM} do iloczynu energii zmagazynowanej w postaci pola elektrycznego W_E oraz energii mechanicznej (energii potencjalnej sprężystości) W_M :

$$k^2 = \frac{W_{EM}^2}{W_E \cdot W_M}, \text{ gdzie:} \quad (6a)$$

$$W_{EM} = \frac{1}{2} S_3 E_3 = \frac{1}{2} d_{33} E_3 T_3 \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (6b)$$

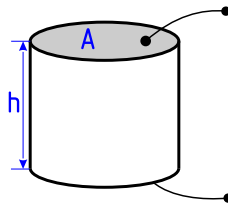
$$W_E = \frac{1}{2} E_3 D_3 = \frac{1}{2} \epsilon_{33}^T E_3^2 \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (6c)$$

$$W_M = \frac{1}{2} S_3 T_3 = \frac{1}{2} s_{33}^E T_3^2 \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (6d)$$

W zależności od materiału, rodzaju wzbudzonych drgań i warunków brzegowych przy jakich pracuje element wykonany z materiału piezoelektrycznego liczbowe wartości k mogą osiągać wartości od 0,01 do 0,75. Im ta wartość jest większa, tym większa skuteczność przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną i odwrotnie.

Współczynnik ten można wyznaczyć na różne sposoby. Jeden z nich polega na pomiarze przenikalności dielektrycznej wolnej ϵ^T i obciążonej ϵ^S piezoelektryka. Związek między tymi właściwościami opisuje zależność:

$$\epsilon^S = \epsilon^T (1 - k^2) \quad (7)$$



Rysunek 1: Przykład dielektryka z elektrodami o prostej geometrii kondensatora płaskorównoległego.

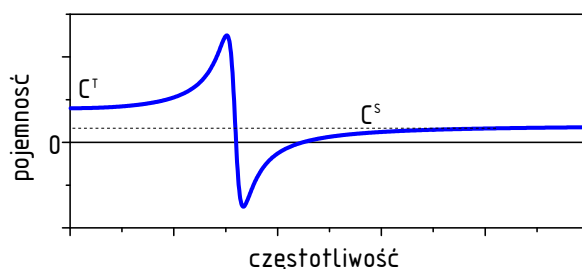
Jak wyznaczyć te dwie przenikalności elektryczne? Jeśli element piezoelektryczny ma regularny kształt, na przykład walca lub pastylki, na której elektrody umieszczone są np. jak na rysunku 1, wtedy łatwo jest wyliczyć przenikalność ϵ przez pomiar pojemności C na podstawie równania opisującego pojemność kondensatora płaskiego:

$$C = \epsilon \frac{A}{h} \quad (8)$$

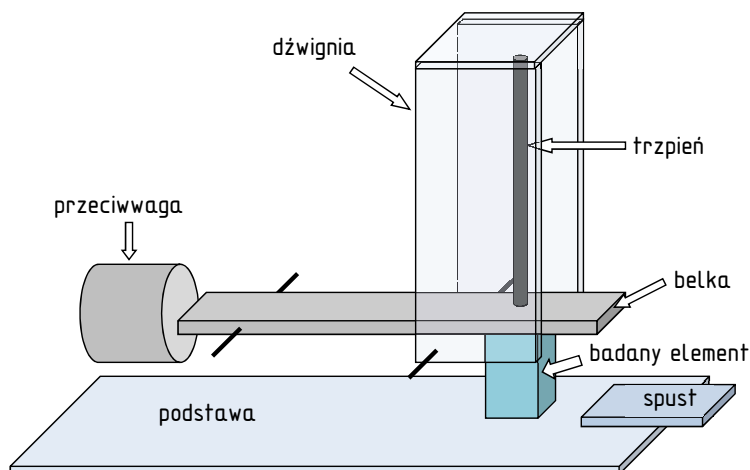
gdzie ϵ to przenikalność bezwzględna,³ A – pole powierzchni okładki kondensatora, h – odległość pomiędzy okładkami, w tym wypadku grubość piezoelektryka.

Pojemność można dokładnie zmierzyć za pomocą mierników RLC bądź analizatorów impedancji. W obu wypadkach do kondensatora przyłożone jest napięcie o zadanej częstotliwości i na podstawie zmierzonego natężenia przepływającego prądu wylicza się pojemność. Dla rezonatora wartość ta zależy od częstotliwości, przy której dokonuje się pomiaru, jak pokazano na rysunku 2.

³Przenikalność bezwzględna $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$, gdzie ϵ_0 to przenikalność elektryczna próżni a ϵ_r to przenikalność elektryczna względna materiału.



Rysunek 2: Zależność pojemności rezonatora piezoelektrycznego od częstotliwości.



Rysunek 3: Stanowisko do pomiarów prostego efektu piezoelektrycznego metodą statyczną.

Jeśli element piezoelektryczny jest zamocowany swobodnie a częstotliwość, przy której dokonuje się pomiaru jest znacznie poniżej częstotliwości rezonansowej, wtedy piezoelektryk zdąży się odkształcić przy każdym cyklu napięcia pomiarowego a swobodne zamocowanie spowoduje, że brak będzie zewnętrznych naprężeń, które można uznać za stałe.

Gdy z drugiej strony częstotliwość pomiaru znacznie przekracza rezonansową, wtedy piezoelektryk nie nadąży się odkształcać. W ten sposób zmieniając częstotliwość dokonać pomiaru C^T oraz C^S , z których na podstawie (8) można określić przenikalności ϵ^T i ϵ^S .

2 Program ćwiczenia

2.1 Pomiar i wyznaczenie modułu piezoelektrycznego d metodą statyczną

Zadanie polega na pomiarze ładunku wygenerowanego na elementach piezoelektrycznych, umieszczonych w stanowisku pomiarowym (rysunek 3), na które wywierany jest nacisk związany z ciężarem użytych obciążników. Dostępne obciążenia: 100 g, 200 g, 200 g, 500 g, 1000 g (obciążniki duże).

Akwizycja danych jest półautomatyczna (program piezo.vee). Program rejestruje wskazania elektrometru w czasie trwania pomiaru. Opcja ZERO CHECK powoduje zwarcie (opcja uaktywniona) lub rozwarcie wejścia elektrometru. Procedura pomiaru:

1. Sprawdzić, czy nieobciążona belka nie naciska na mierzony element, w razie potrzeby wyregulować przeciwwagę.
2. Uruchomić program `piezo.vee` i nacisnąć START,
3. Zewrzeć wejście elektrometru zaznaczając opcję ZERO CHECK w programie.
4. Obrócić dźwignię (rysunek 3) do oporu w lewo.

5. Obciążyć mierzony element dobranymi ciężarkami umieszczanymi na trzpieniu.
6. Obrócić dźwignię z powrotem do oporu do pozycji pionowej.
7. Rozewrzeć wejście elektrometru usuwając zaznaczenie ZERO CHECK.
8. Przycisnąć spust, na element piezoelektryczny wywierany jest nacisk.
9. Po kilku sekundach ponownie zewrzeć wejście elektrometru (ZERO CHECK).
10. Powtórzyć algorytm pomiaru efektu piezoelektrycznego od punktu d) dla dostępnych obciążeń (od 100 g do 2000 g, a następnie od 2000 g do 100 g, z krokiem co 200 g).
11. Zapisane dane należy wykreślić. Z wykresu wyznaczyć wartości ładunku przy kolejnych obciążeniach.
12. Sporządzić wykres zależności wygenerowanego ładunku od siły nacisku.

Na podstawie przeprowadzonej serii pomiarów należy wyznaczyć wartość modułu piezoelektrycznego d_{33} , który nazywany jest również stałą ładunkową. Porównaj wyniki swoich pomiarów z wartościami tego parametru dla typowych ceramiek piezoelektrycznych (parametr d_{33} w tabeli 1).

2.2 Pomiar współczynnika sprzężenia elektromechanicznego na podstawie pomiaru pojemności

Pomiar sprowadza się do wyznaczenia pojemności C^T i C^S używając do tego miernika RLC w sposób wskazany przez prowadzącego. Na podstawie uzyskanych wartości oraz wiedzy, na temat wymiarów badanej próbki piezoelektryka należy wyznaczyć:

1. Przenikalności elektryczne bezwzględne ϵ^T i ϵ^S korzystając z równania (8) i zmierzonych C^T i C^S .
2. Przenikalności elektryczne względne ϵ_r^T i ϵ_r^S .
3. Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego, korzystając z równania (7).

2.3 Wyznaczenie stałej napięciowej i parametrów mechanicznych piezoelektryka

Na podstawie pomiarów i obliczeń dokonanych w poprzednich punktach obliczyć:

1. Wartość stałej napięciowej g równej $g = \frac{d}{\epsilon^T}$.
2. Podatność mechaniczną s^E korzystając z zależności $k = \frac{d}{\sqrt{\epsilon^T s^E}}$.
3. Moduł sprężystości c^E , będący odwrotnością podatności mechanicznej.

Materiały dodatkowe

Tabela 1: Podstawowe parametry materiałowe wybranych ceramiek piezoelektrycznych.

Materiał	840	841	850	Typ IV	880
względna przenikalność elektryczna ϵ_{33r}^T	1250	1350	1900	3400	1000
współczynnik strat $tg\delta$	0,40	0,35	1,40	1,70	0,35
temperatura Curie [$^{\circ}\text{C}$]	325	320	360	180	310
gęstość $\rho[g/cm^3]$	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
dobroć mechaniczna Q_m	500	1400	80	65	1000
współczynniki sprzężenia elektromechanicznego					
k_p	0,59	0,60	0,63	0,77	0,50
k_t	0,59	0,60	0,63	0,77	0,50
k_{33}	-	-	-	0,52	-
k_{31}	0,72	0,68	0,72	-	0,62
k_{15}	0,35	0,33	0,36	-	0,30
moduły piezoelektryczne $\left[\frac{pC}{N}\right], \left[\frac{pm}{V}\right]$					
d_{33}	290	300	400	650	215
$-d_{31}$	125	109	175	-	95
d_{15}	480	450	590	-	330
stałe ładunkowe $\left[\frac{mV \cdot m}{N}\right], \left[\frac{mC}{m^2}\right]$					
g_{33}	26,5	25,5	24,8	20,9	25,0
$-g_{31}$	11,0	10,5	12,4	-	10,0
g_{15}	38,0	35,0	36,0	-	28,0
moduły sprężystości [GPa]					
c_{11}	80	76	63	59	90
c_{33}	68	63	54	51	72
stałe częstotliwości drgań $\left[\frac{m}{s}\right]$					
N_L	1524	1700	1500	-	1725
N_T	2005	2005	2040	2040	2110
N_P	2130	2055	2080	1980	2120