

# Laboratorium Półprzewodniki, Dielektryki i Magnetyki

## Ćwiczenie 5

### Badanie odwrotnego efektu piezoelektrycznego

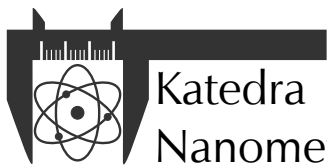
dr inż. Tomasz Piasecki (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl)

## Zagadnienia do przygotowania

1. Elektrostrykcja i odwrotny efekt piezoelektryczny
2. Podstawowe równania elektromechaniki
3. Stosowana w ćwiczeniu metoda pomiaru odwrotnego efektu piezoelektrycznego, kroki pomiaru, otrzymywane wielkości i ich jednostki
4. Zależność wartości polaryzacji dielektryka liniowego i ferroelektryka w zależności natężenia zewnętrznego pola elektrycznego
5. Współczesne zastosowania przetworników piezoelektrycznych

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>1</b>
1.1	Pojemnościowa detekcja przemieszczeń . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Program ćwiczenia</b>	<b>2</b>
2.1	Kalibracja stanowiska pomiarowego . . . . .	4
2.2	Wyznaczenie modułu piezoelektrycznego . . . . .	4



Katedra  
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów  
Politechnika Wrocławska

# 1 Wstęp

Tematyka tego ćwiczenia **wymaga znajomości informacji dotyczących zjawiska piezoelektrycznego, jego opisu oraz równań elektromechaniki**. Informacje te są przedstawione w instrukcji do ćwiczenia pt. „Pomiary i wyznaczanie parametrów ceramiki piezoelektrycznej” tego kursu. Innymi słowy, należy być zaznajomionym z definicjami i nazwami parametrów i zmiennych występujących w poniższych równaniach:

$$\begin{cases} D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E \\ S = s^E \cdot T + d \cdot E \end{cases} \quad \begin{matrix} (1a) \\ (1b) \end{matrix}$$

$$\begin{cases} D = e \cdot S + \epsilon^S \cdot E \\ T = c^E \cdot S + e \cdot E \end{cases} \quad \begin{matrix} (2a) \\ (2b) \end{matrix}$$

$$\begin{cases} E = -g \cdot T + \beta^T \cdot D \\ S = s^D \cdot T + g \cdot D \end{cases} \quad \begin{matrix} (3a) \\ (3b) \end{matrix}$$

$$\begin{cases} E = -h \cdot S + \beta^S \cdot D \\ T = c^D \cdot S - h \cdot D \end{cases} \quad \begin{matrix} (4a) \\ (4b) \end{matrix}$$

W równaniach tych 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  $\epsilon$  i jej odwrotność  $\beta$ , 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  $e$ .

## 1.1 Pojemnościowa detekcja przemieszczeń

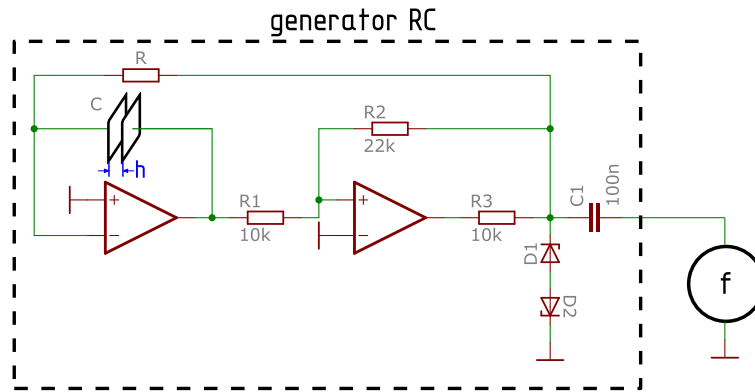
Odwrotny efekt piezoelektryczny jest dość trudny do pomiaru ze względu na niewielkie wartości przemieszczeń. Typowo tego rodzaju badania przeprowadza się przy użyciu metod optycznych bazujących na interferencji światła spójnego. Pozwalają one na pomiary przemieszczeń rzędu dziesiątków pikometrów ( $n \times 10^{-11}m$ ).

Inną metodą na bezstykowy pomiar przemieszczeń jest metoda pojemnościowa. Bazuje ona na prostym pomysśle. Jeśli jedną okładkę kondensatora powietrznego zamocuje się nieruchomo a druga będzie się poruszała na skutek wydłużeń badanego elementu, to zmiana wymiarów badanej próbki spowoduje zmianę pojemności kondensatora.

Pojemność (czy jej zmiany) nie jest łatwa do pomiaru wprost. Łatwo za to mierzy się częstotliwość. Wystarczy zatem użyć układu generatora RC, którego częstotliwość pracy zależy od iloczynu  $R \cdot C$ , aby można było wykryć zmiany odległości pomiędzy okładkami. Generator ten pełni rolę przetwornika pojemność - częstotliwość. Tego rodzaju układ został przedstawiony na rysunku 1.

Generator składa się z układu całkującego, w którego sprzężeniu zwrotnym zastosowano kondensator  $C$ , którego pojemność chcemy mierzyć i stopnia wzmacniającego. Pojemność kondensatora pomiarowego jest odwrotnie proporcjonalna do odległości pomiędzy jego okładkami  $h$ :

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (5)$$



Rysunek 1: Uproszczony schemat układu do pojemnościowej detekcji pojemności  $C$  z przetwornikiem pojemność - częstotliwość.

gdzie  $A$  to pole powierzchni okładki kondensatora. Natomiast częstotliwość pracy generatora z rysunku 1 dana jest równaniem:

$$f = \frac{1}{2RC} \quad (6)$$

gdzie  $R$  to wartość rezystora użytego w generatorze. Częstotliwość pracy generatora mierzona jest za pomocą częstotlicznika.

W praktyce, na pomiar dodatkowo wpływają będą inne czynniki. Jednym z nich jest pojemność pasożytnicza doprowadzeń i układu pomiarowego, która z elektrycznego punktu widzenia dołączona jest równolegle do kondensatora pomiarowego i sumuje się z nią. Drugim jest fakt, że okładki kondensatora pomiarowego mogą nie być idealnie płaskie oraz idealnie równoległe. Skutkuje to tym, że zetknięcie się ich nie oznacza odległości  $h$  równej zero na całej ich powierzchni. Wpływ tych czynników można wyeliminować kalibrując urządzenie.

Kalibracja polega na eksperymentalnym wyznaczeniu wskazań pojemności  $C$  od mierzonej odległości  $h$  między okładkami kondensatora. Z powodów wymienionych powyżej nie będzie to zależność czysto hiperboliczna, jak w równaniu (5), ale pojawią się w nim dodatkowe czynniki i przyjmie ona postać:

$$C = C_0 + \frac{\epsilon_0 A}{h + h_0} = C_0 + \frac{k}{h + h_0} \quad (7)$$

gdzie  $C_0$  to parametr uwzględniający pojemność pasożytniczą,  $h_0$  to czynnik uwzględniający niedokładności mechaniczne kondensatora pomiarowego. Dla wygody, zarówno wymiary okładek jak i przenikalność elektryczna zostały zebrane w jeden czynnik  $k$ .

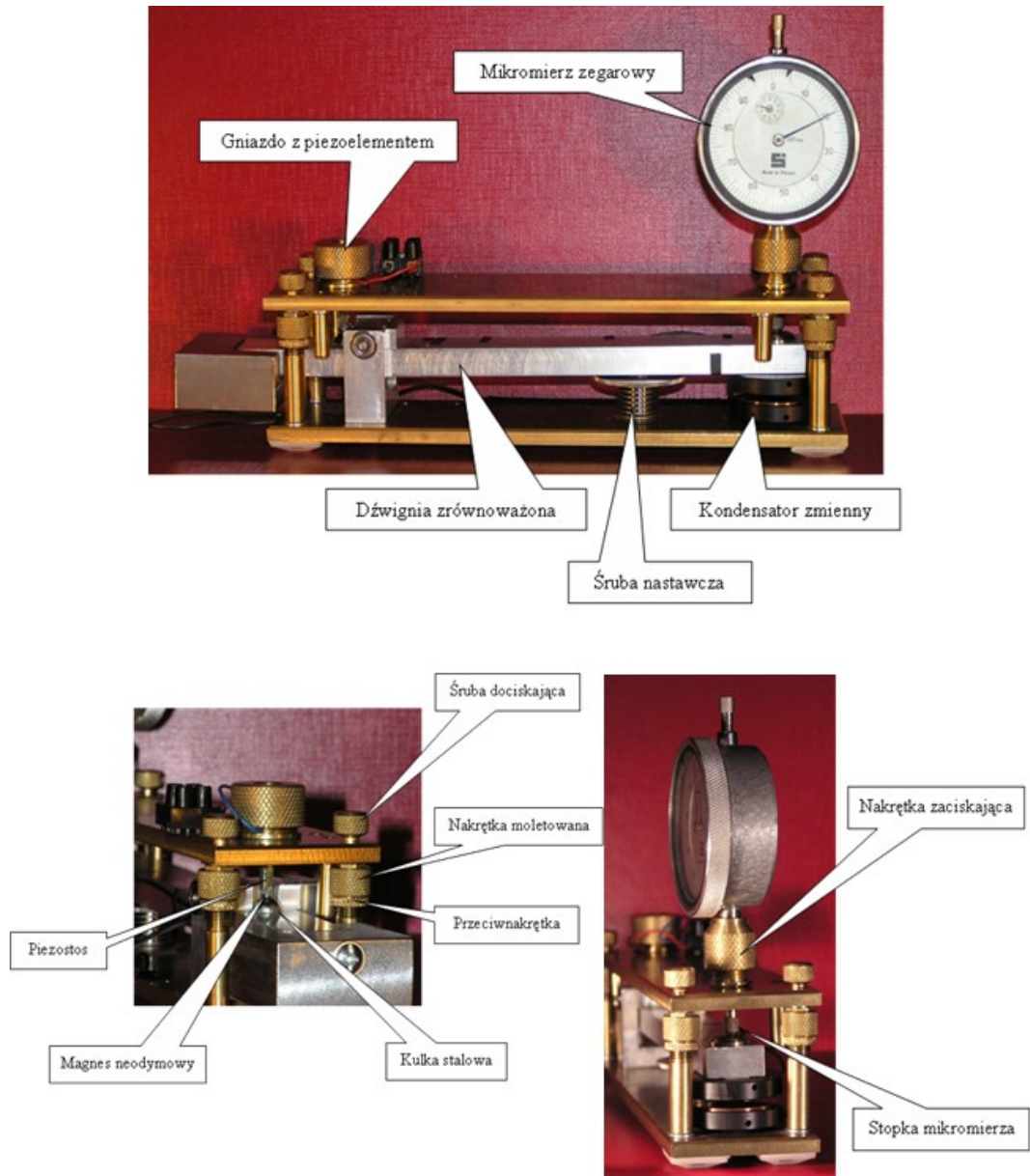
Kalibrując układ należy przeprowadzić serię pomiarów, w których okładki kondensatora oddalone będą o różne odległości i wyznaczyć dla nich pojemność. Stosując metody numeryczne można dopasować wyniki pomiaru funkcją z równania (7).

## 2 Program ćwiczenia

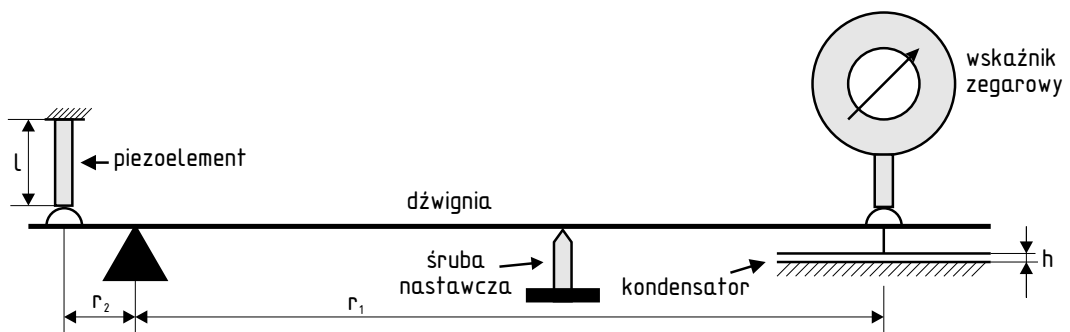
Badanie odwrotnego efektu piezoelektrycznego odbywa się za pomocą stanowiska przedstawionego na rysunkach 2 i 3.

Badanym elementem piezoelektrycznym jest piezostos (rysunek 4). Składa się on z 78 warstw ceramiki piezoelektrycznej przedzielonych elektrodami. Całkowita długość aktywnego obszaru piezostosu to 8,2 mm. Napięcie polaryzujące piezostos oddziałuje na każdą warstwę osobno przez co zmiana  $\Delta l$  długości  $l$  piezostosu jest 78 razy większa, niż pojedynczej warstwy.

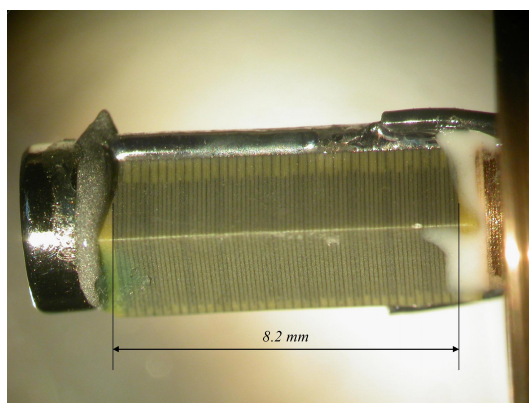
Górny koniec piezostosu zamocowany jest nieruchomo a koniec dolny oddziałuje na dźwignię prostą, której przełożenie określa stosunek  $r_2$  do  $r_1$ . W stanowisku do pomiaru odwrotnego efektu piezoelektrycznego  $r_1 = 150 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 10 \text{ mm}$ .



Rysunek 2: Fotografia stanowiska do pomiaru odwrotnego zjawiska piezoelektrycznego.



Rysunek 3: Schemat budowy stanowiska do pomiaru odwrotnego efektu piezoelektrycznego.



Rysunek 4: Makrofotografia piezostosu używanego do badania odwrotnego efektu piezoelektrycznego.

Do drugiego końca dźwigni zamocowano ruchomą okładkę kondensatora pomiarowego, druga jego okładka jest nieruchoma. Ruchy dźwigni, wywołane zmianą długości piezostosu  $\Delta l$  powodują zmiany odległości  $h$  pomiędzy okładkami kondensatora.

Śruba nastawcza i wskaźnik zegarowy wykorzystywane są wyłącznie do kalibracji stanowiska, przy normalnym pomiarze nie stykają się z dźwignią.

## 2.1 Kalibracja stanowiska pomiarowego

Przed przystąpieniem do pomiarów należy dokonać kalibracji stanowiska pomiarowego.

1. **Zwolnić nacisk piezostosu na dźwignię** przez zluźnienie dwóch śrub dociskowych przy piezostosie. Wykonanie tego kroku jest bardzo ważne, w przeciwnym wypadku można uszkodzić urządzenie.
2. Wkręcić śrubę nastawczą tak, aby nie podierała dźwigni.
3. Poluzować nakrętkę zaciskającą wskaźnik zegarowy i opuścić jego stopkę na dźwignię. Zaciśnąć nakrętkę ponownie. Wyzerować wskaźnik pokręcając jego skalą.
4. Włączyć zasilanie przetwornika prąd - napięcie: 12 V, ograniczenie prądowe 20 mA.
5. Do wyjścia przetwornika dołączyć multimetr i wybrać w nim funkcję pomiaru częstotliwości.
6. Dokonać pomiaru wskazywanej częstotliwości dla wskazanego przez prowadzącego zakresu odległości. Odległość pomiędzy okładkami ustalać za pomocą śruby nastawczej obserwując wskaźnik zegarowy. Uwaga: wskazywana częstotliwość 50 Hz oznacza nieprawidłową pracę układu.
7. **Po skończonym pomiarze wkręcić z powrotem śrubę nastawczą tak, aby nie dotykała dźwigni i unieść wskaźnik zegarowy.**
8. Wyznaczyć pojemność dla każdego punktu krzywej kalibracyjnej i sporządzić wykres  $C = f(h)$ .
9. Korzystając z dopasowania krzywych nieliniowych w programie Origin wyznaczyć wartości współczynników kalibracyjnych (dopasowanie funkcją Rational4 z grupy funkcji Rational). Zapisz jednostki tych współczynników.

## 2.2 Wyznaczenie modułu piezoelektrycznego

W trakcie właściwych pomiarów czujnik zegarowy i śruba nastawcza nie stykają się z dźwignią. Zmiany jej wychylenia określane są bezdotykowo, na podstawie pomiaru częstotliwości generatora RC dokonywanych za pomocą częstotliciemierza.

W trakcie pomiarów należy:

1. **Upewnić się, że wskaźnik zegarowy nie styka się z dźwignią.**
2. Upewnić się, że piezostos znajduje się w kontakcie z dźwignią poprzez dokręcenie śrub dociskowych przy piezostosie, a początkowa odległość pomiędzy okładkami kondensatora pomiarowego jest taka, że częstotliwość  $f$  znajduje się w przedziale częstotliwości, jakie były rejestrowane w trakcie kalibracji.
3. W sposób wskazany przez prowadzącego zajęcia określić zależność częstotliwości  $f$  of napięcia  $U$  przyłożonego do piezostosu. Napięcie to powoduje zmianę wymiarów piezostosu co powinno skutkować zmianami w mierzonej częstotliwości.
4. Obliczyć wartości pojemności dla zmierzonych punktów pomiarowych. Uwaga: użyj takich jednostek pojemności, jakie były stosowane przy kalibracji!
5. Przekształć równanie (7) tak, aby pozwalało na wyliczenie wartości  $h$  na podstawie znajomości  $C$  i współczynników kalibracyjnych.
6. Uwzględniając współczynniki kalibracyjne, przełożenie dźwigni oraz wielowarstwową budowę piezoelektryka, wykreślić zależność wydłużenia pojedynczej warstwy piezostosu od napięcia.
7. Na podstawie tej zależności wyznaczyć wartość podłużnego modułu piezoelektrycznego  $d_{33}$ .
8. Czy zależność odkształcenia od napięcia jest liniowa? Skomentuj uzyskane wyniki pod tym kątem.

# Materiały dodatkowe

Tabela 1: Podstawowe parametry materiałowe wybranych ceramiek piezoelektrycznych.

Materiał	840	841	850	Typ IV	880
względna przenikalność elektryczna $\epsilon_{33r}^T$	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 $\rho$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	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 $\left[\frac{\text{pC}}{\text{N}}\right], \left[\frac{\text{pm}}{\text{V}}\right]$					
$d_{33}$	290	300	400	650	215
$-d_{31}$	125	109	175	-	95
$d_{15}$	480	450	590	-	330
stałe ładunkowe $\left[\frac{\text{mV}\cdot\text{m}}{\text{N}}\right], \left[\frac{\text{mC}}{\text{m}^2}\right]$					
$g_{33}$	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 $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$					
$N_L$	1524	1700	1500	-	1725
$N_T$	2005	2005	2040	2040	2110
$N_P$	2130	2055	2080	1980	2120