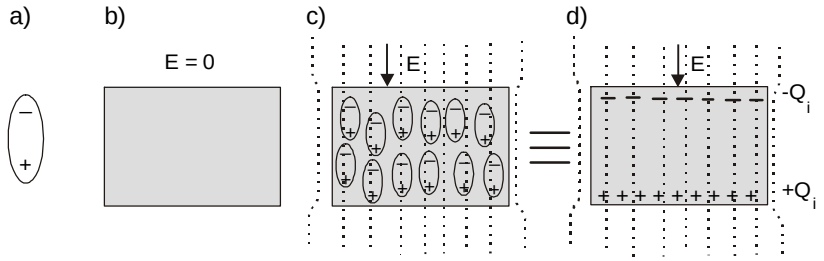
Ćwiczenie **43**

WYZNACZANIE WZGLĘDNEJ PRZENIKALNOŚCI ELEKTRYCZNEJ CIAŁ STAŁYCH

43.1. Wiadomości ogólne

Dielektrykami nazywamy ciała stałe, ciecze lub gazy, których oporność właściwa jest większa od ok. 10^6 Ωm. Dielektryk umieszczony w polu elektrycznym, w wyniku zjawiska polaryzacji, modyfikuje to pole. Zewnętrzne pole elektryczne powoduje w każdym atomie i cząsteczce dielektryka przesunięcie ładunku ujemnego elektronów względem ładunku dodatniego jąder atomowych. Zjawisko to nazywamy polaryzacją indukowaną, a ten rodzaj dielektryków określa się jako niepolarne. Powstały układ przesuniętych względem siebie ładunków dodatniego i ujemnego nazywamy dipolem (rys. 43.1a). W niektórych dielektrykach, tzw. dielektrykach polarnych, cząsteczki są już trwałymi dipolami. W tym przypadku zewnętrzne pole elektryczne powoduje dodatkowo, także częściowe uporządkowanie trwałych dipoli (polaryzacja orientacyjna). Jedną z przyczyn niepełnego uporządkowania dipoli jest ruch cieplny. Oddziaływanie pola elektrycznego na dielektryk pokazane jest na rys. 43.1b,c,d.



Rys. 43.1

W ciałach stałych decydującą rolę odgrywa polaryzacja indukowana. Nawet gdy w materiale występują trwałe dipole, mogą one tylko w niewielkim stopniu zmieniać swoje ustawienie pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. W niektórych ciałach stałych, nawet bez zewnętrznego pola elektrycznego, znajdują się obszary o spontanicznej polaryzacji, zwane domenami. Ponieważ domeny zorientowane są przypadkowo, wypadkowa polaryzacja całego dielektryka jest równa zeru. Zewnętrzne pole elektryczne uporządkowuje domeny, silnie polaryzując dielektryk. Dielektryki o strukturze domenowej nazywamy ferroelektrykami lub segnetoelektrykami.

Układ dwóch przewodników rozdzielonych warstwą izolatora nazywamy kondensatorem. Wprowadzenie na okładki kondensatora równych, lecz różnoimiennych ładunków Q, powoduje wytworzenie między okładkami różnicy potencjałów U. Stosunek zgromadzonego na jednej z okładek kondensatora ładunku Q do różnicy potencjałów między okładkami U nazywamy pojemnością kondensatora C

$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (43.1)$$

Kondensator, którego elektrodami są dwie metalowe płyty ustawione równolegle, nazywamy kondensatorem płaskim. Jego pojemność C jest wprost proporcjonalna do powierzchni płyt S i odwrotnie proporcjonalna do odległości między płytami d. W przypadku, gdy $d \ll \sqrt{S}$, a między elektrodami jest powietrze lub próżnia, pojemność takiego kondensatora można obliczyć ze wzoru

$$C_o = \frac{\varepsilon_o S}{d}, \qquad (43.2)$$

gdzie: ε_o – stała dielektryczna próżni równa $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ [F /m].

Między okładkami kondensatora płaskiego dołączonego do źródła napięcia U powstaje jednorodne pole elektryczne o natężeniu $E_0 = U/d$, a na okładkach kondensatora gromadzi się ładunek Q (rys. 43.2a).

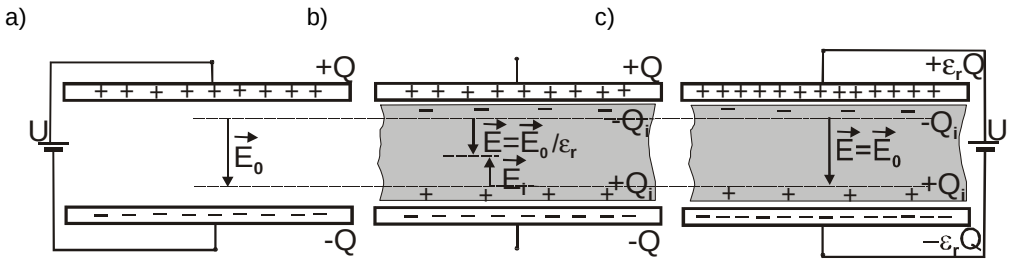
Wprowadzony między okładki naładowanego kondensatora dielektryk ulega polaryzacji, dzięki której w pobliżu jego powierzchni pojawiają się nieskompensowane ładunki związane zwane indukowanymi ładunkami polaryzacyjnymi Q_i. Ładunki indukowane Q_i są źródłem wewnętrznego pola elektrycznego E_i zwróconego przeciwnie do zwrotu zewnętrznego pola E_o (rys. 43.2b).

Jeżeli dielektryk został wprowadzony po odłączeniu kondensatora od źródła (Q = const), to wprowadzenie dielektryka powoduje zmniejszenie wypadkowego natężenia pola elektrycznego między okładkami kondensatora do wartości

$$E = E_0 - E_i = \frac{E_0}{\varepsilon_r}, \qquad (43.3)$$

oraz analogiczne zmniejszenie napięcia, co – przy założeniu Q = const. i równaniu (43.1) – jest równoznaczne ze wzrostem pojemności kondensatora do wartości

$$C = \varepsilon_r C_0 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d}. \qquad (43.4)$$



Rys. 15.2

Jeżeli dielektryk został wprowadzony między okładki kondensatora połączonego na stałe ze źródłem napięcia U, to zmiana napięcia oraz natężenia pola między okładkami jest niemożliwa. Zachowanie stałej wartości natężenia pola elektrycznego mimo wytworzenia – dzięki polaryzacji dielektrycznej – przeciwnie zwróconego pola E_i, wymaga więc zwiększenia ładunku zgromadzonego na okładkach kondensatora do wartości $\varepsilon_r Q$ (rys. 43.2c), co – przy założeniu U = const. i równaniu (43.1) – również oznacza wzrost pojemności kondensatora do wartości $C = \varepsilon_r C_0$.

Względna przenikalność elektryczna dielektryka ε_r jest liczbową miarą jego zdolności polaryzacyjnych, określoną jako stosunek natężenia pola elektrycznego E_0 wytworzonego przez ładunek Q w próżni do natężenia pola elektrycznego E wytworzonego przez ten ładunek w dielektryku (43.3). W praktyce wygodniej jest wyznaczać względną przenikalność elektryczną dielektryka ε_r, ze wzoru (43.4), jako stosunek pojemności C kondensatora wypełnionego dielektrykiem do pojemności C_o takiego samego kondensatora próżniowego

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}. \qquad (43.5)$$

43.2. Zadania

43.2.1. Zmierzyć pojemność C_0 kondensatora powietrznego dla kilku różnych odległości d między jego elektrodami zaczynając od 1 mm.

43.2.2. Zmierzyć pojemność C kondensatora wypełnionego płytkami z badanego dielektryka o różnej grubości (w podobnym zakresie odległości jak w p.43.2.1).

43.2.3. Narysować wykres zależności C_0 oraz C od 1/d.

43.2.4. Wyznaczyć względną przenikalność elektryczną ε_r badanego dielektryka.

43.2.5. Wyznaczyć pojemności montażowe C_m dla kondensatora powietrznego i wypełnionego dielektrykiem.

43.3. Zasada i przebieg pomiarów

Pomiar względnej przenikalności elektrycznej dielektryka sprowadza się do pomiaru pojemności kondensatora powietrznego i kondensatora wypełnionego dielektrykiem. Pomiar pojemności przeprowadza się za pomocą miernika pojemności. Instrukcja obsługi miernika oraz dane dotyczące kondensatora pomiarowego znajdują się na stanowisku pomiarowym.

Miernik pojemności mierzy sumę pojemności elektrod kondensatora pomiarowego C_k oraz pojemności montażowych C_m, złożonych z pojemności przewodów łączących miernik z kondensatorem oraz pojemności wsporników mocujących jego elektrody

$$C = C_k + C_m. \tag{43.6}$$

Po uwzględnieniu (43.2) oraz (43.5), otrzymujemy dla kondensatora powietrznego

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d} + C_{m_0}, \tag{43.7}$$

a dla kondensatora z dielektrykiem

$$C_d = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d} + C_{m_d}. \tag{43.8}$$

Wprowadzając oznaczenia:

$$y_o = C_0,\ y_d = C_d,$$

$$x = \frac{1}{d},$$

$$a_o = \varepsilon_0 S,\ a_d = \varepsilon_r \varepsilon_0 S,$$

$$b_b = C_{m_0},\ b_d = C_{m_d},$$

otrzymamy równania regresji liniowej dla zależności (43.7) i (43.8):

$$y_0 = a_0 x + b_0, \tag{43.9}$$

$$y_d = a_d x + b_d, \tag{43.10}$$

co umożliwia wyznaczenie odpowiednich parametrów a i b metodą najmniejszych kwadratów (Wstęp, wzór (38)):

$$a_0 = \frac{\overline{xy_0} - \bar{x} \cdot \overline{y_0}}{\overline{x^2} - \left(\bar{x}\right)^2}, \tag{43.11}$$

$$a_d = \frac{\overline{xy_d} - \bar{x} \cdot \overline{y_d}}{\overline{x^2} - \left(\bar{x}\right)^2}, \tag{43.12}$$

$$b_o = \bar{y}_o - a_0 \cdot \bar{x}, \tag{43.13}$$

$$b_d = \bar{y}_d - a_d \cdot \bar{x}, \tag{43.14}$$

gdzie: $\overline{xy_0} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i}C_{0_i}$,

$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i}$,

$\overline{y_0} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}C_{0_i}$,

$\overline{x^2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i^2}$ i analogicznie dla y_d,

n – liczba punktów pomiarowych.

Po wyznaczeniu wartości a_0 i a_d, obliczamy względną przenikalność elektryczną dielektryka ε_r ze wzoru

$$\varepsilon_r = \frac{a_d}{a_o}. \qquad (43.15)$$

Parametry b_0 i b_d określają wartości odpowiednich pojemności montażowych C_m.

43.4. Ocena niepewności pomiarów

Niepewność pomiarów parametrów a_0 i a_d wyznaczamy, stosując metodę najmniejszych kwadratów (Wstęp, wzór (39))

$$u(a) = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \left(\frac{\overline{y^2} - a\overline{xy} - b\overline{y}}{\overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2} \right)}, \qquad (43.16)$$

odpowiednio dla a_0 i a_d,

gdzie: $$\overline{y^2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} C_i^2 .$$

Niepewność pomiaru pojemności montażowych C_m

$$u(C_m) = u(b) = u(a) \cdot \sqrt{\overline{x^2}}, \qquad (43.17)$$

odpowiednio dla C_{m0} i C_{md}.

Niepewność pomiaru względnej przenikalności elektrycznej ε_r wyznaczamy metodą pochodnej logarytmicznej zastosowaną do wzoru (43.15)

$$\delta_\varepsilon = \left|\frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r}\right| = \left|\frac{-u(a_0)}{a_0}\right| + \left|\frac{u(a_d)}{a_d}\right| \qquad (43.18)$$

oraz $$\Delta\varepsilon_r = \delta_\varepsilon \varepsilon_r .$$

Literatura

[1] Halliday D., Resnick R.: Fizyka, t. II. Warszawa: PWN 1983.

[2] Jaworski B., Piński A.: Elementy fizyki, t. II. Warszawa: PWN 1977.