

MATERIAŁY DYDAKTYCZNE

do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

Materiałoznawstwo elektrotechniczne

dla studentów kierunku

Elektrotechnika

Opracował zespół w składzie:

dr inż. Przemysław Rogalski

dr inż. Konrad Kierczyński

dr inż. Paweł Okal

Lublin 2025 r.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 1

Badanie podstawowych właściwości materiałów przewodzących

Lublin 2025 r.

Cel ćwiczenia

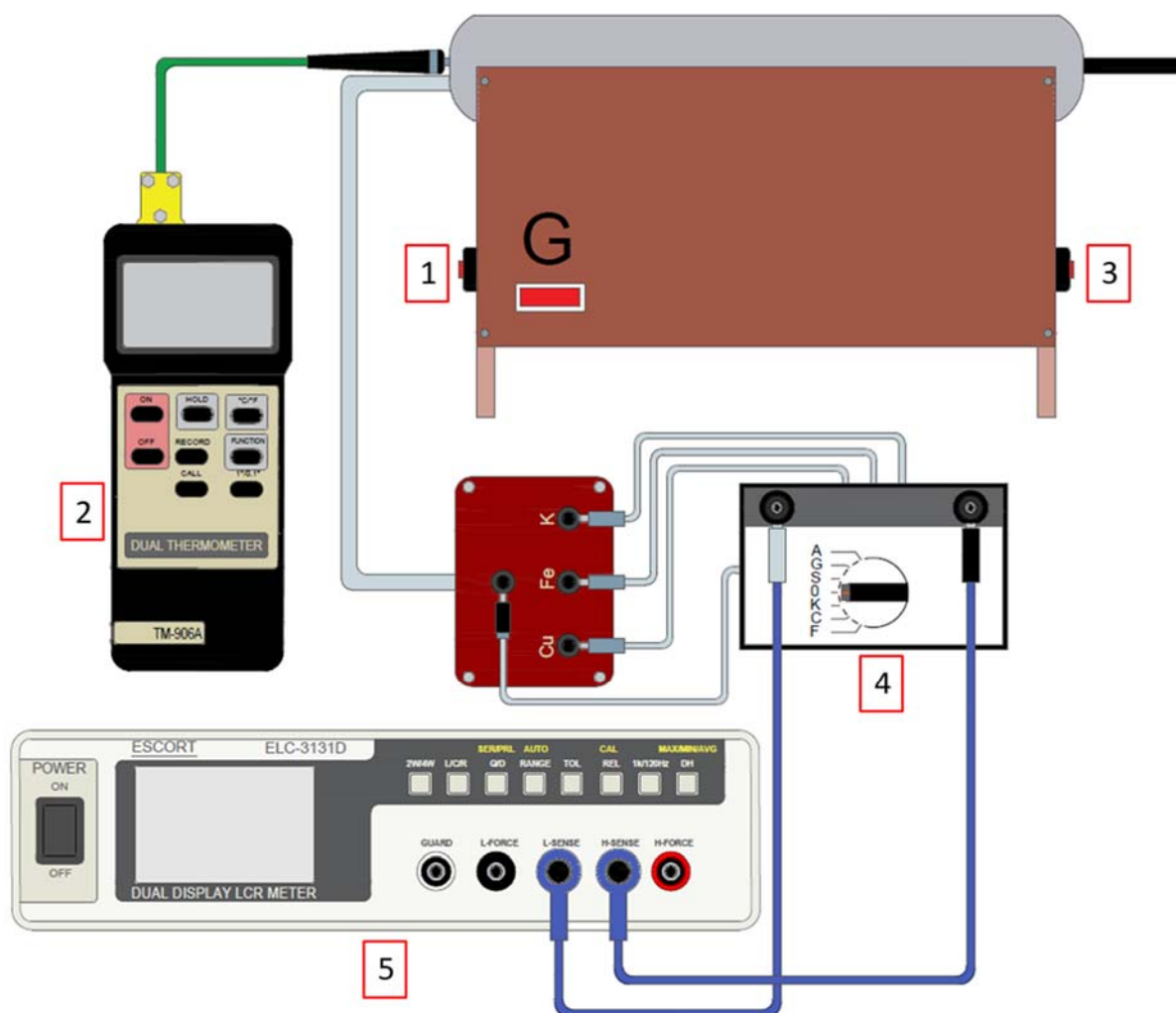
Celem ćwiczenia jest określenie rezystywności metali i wyznaczenie temperaturowego współczynnika rezystywności trzech różnych materiałów przewodzących.

Zakres ćwiczenia

Zakres ćwiczenia obejmuje wykonanie serii pomiarów mających na celu określenie właściwości elektrycznych trzech materiałów przewodzących: żelaza, miedzi oraz konstantanu, w zależności od temperatury. W pierwszej kolejności przeprowadzone zostaną pomiary rezystancji próbek tych materiałów w szerokim zakresie temperatur, wykorzystując elektroniczny miernik rezystancji oraz precyzyjne odczyty przy zmianie temperatury co 10°C w zakresie od 30°C do 140°C . Dla każdej próbki, rezystancja, przekrój poprzeczny oraz długość, umożliwi obliczenie rezystywności materiałów w funkcji temperatury. Na tej podstawie zostaną sporządzone charakterystyki temperaturowe badanych materiałów, które z kolei pozwolą na obliczenie temperaturowego współczynnika rezystywności dla każdego z nich.

Stanowisko pomiarowe

W niniejszym ćwiczeniu wykorzystano stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. To stanowisko pozwala na zmierzenie rezystancji trzech próbek materiałów przewodzących umieszczonych w komorze w której są ogrzewane. Próbki w postaci cienkich przewodów ogrzewane są za pomocą grzałki, a umieszczona wewnątrz termopara pozwala śledzić ich temperaturę i wyświetlać wynik na termometrze elektronicznym. W celu przyspieszenia procesu chłodzenia próbek stanowisko jest wyposażone w układ chłodzenia składający się z wentylatora.



Rysunek 1. Schemat układu pomiarowego do badania wpływu temperatury na rezystancję materiałów przewodzących

Oznaczenia do rysunku 1:

- 1 – przełącznik grzałki,
- 2 – termometr elektroniczny,
- 3 – przełącznik chłodzenia,
- 4 – przełącznik obrotowy do wyboru próbki przy pomiarze rezystancji
- 5 – elektroniczny miernik rezystancji

Wykaz urządzeń i aparatury

- Stanowisko do badań podstawowych właściwości materiałów przewodzących

- Termometr elektroniczny TM-906A
- Elektroniczny miernik rezystancji ESCORT ELC-3131D
- Przełącznik obrotowy

Wykonanie ćwiczenia

Badanie rezystancji materiałów przewodzących w funkcji temperatury

W celu wykonania badania rezystancji materiałów przewodzących w funkcji temperatury należy:

- włączyć termometr elektroniczny TM-906A (2) przyciskiem ON do którego podłączona jest termopara której styk znajduje się we wnętrzu komory, wskazując aktualną temperaturę próbek oraz przyciskiem $1^{\circ}/0.1^{\circ}$ zwiększyć rozdzielczość pomiaru temperatury do części dziesiętnych,
- włączyć elektroniczny miernik rezystancji ESCORT ELC-3131D (5) przyciskiem ON. Następnie przyciskiem L/C/R wybrać pomiar rezystancji (R).
- włączyć grzałkę zasilaną napięciem sieciowym 230 V o mocy 1,5 kW znajdującą się w komorze przełącznikiem (1) ustawiając go w pozycji „1”. Włączenie grzałki jest sygnalizowane zapaleniem się lampki sygnalizacyjnej znajdującej się na płycie czołowej stanowiska,
- gdy temperatura osiągnie 80°C , należy wyłączyć grzałkę, zmieniając stan przełącznika (1) na pozycję „0”, a następnie włączyć chłodzenie, ustawiając przełącznik (3) w pozycję „1”. Chłodzenie ma na celu przyspieszenie procesu schładzania próbek,
- gdy temperatura osiągnie maksymalną wartość i zacznie maleć, wówczas należy rozpocząć pomiar rezystancji. W tym celu, należy na przełączniku obrotowym (4) wybrać pozycję „K” i za pomocą elektronicznego miernika ESCORT ELC-3131D (5) odczytać i zanotować w tabeli 1 rezystancję konstantanu dla danej temperatury. Następnie pozycję przełącznika (4) ustawić w pozycji „C”, odczytać i zanotować w tabeli 1 rezystancję miedzi dla danej temperatury. Po tej czynności ustawić przełącznik (4) w pozycji „F” by analogicznie do poprzedniego kroku odczytać rezystancję żelaza,

- pomiarów należy dokonywać przy opadającej temperaturze co 10 °C, do momentu osiągnięcia przez próbki temperatury 30 °C
- po osiągnięciu tej temperatury należy wyłączyć wszystkie urządzenia

Tabela 1. Wyniki pomiarów rezystancji w zależności od temperatury

L.P.	Temperatura	Rezystancja		
	°C	Miedź (C)	Żelazo (F)	Konstantan (K)
		Ω	Ω	Ω
1.	140			
2.	130			
3.	120			
4.	110			
5.	100			
6.	90			
7.	80			
8.	70			
9.	60			
10.	50			
11.	40			
12.	30			

Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników należy obliczyć rezystywność próbek w funkcji temperatury. W tym celu należy skorzystać ze wzoru:

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

gdzie: R - rezystancja w danej temperaturze, S - pole przekroju próbki, l - długość próbki.

Wymiary próbek niezbędne do obliczeń zostały zebrane w tabeli 2. Wyniki obliczeń

rezystywności należy zestawić w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki obliczeń rezystywności

L.P.	Temperatura	Rezystywność ρ		
	°C	Miedź (C)	Żelazo (F)	Konstantan (K)
		$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot m$	$\Omega \cdot m$
1.	140			
2.	130			
3.	120			
4.	110			
5.	100			
6.	90			
7.	80			
8.	70			
9.	60			
10.	50			
11.	40			
12.	30			

Następnie należy obliczyć temperaturowy współczynnik rezystywności α . Ze względu na nieuniknione niedokładności związane z pomiarami, standardowym podejściem byłoby zastosowanie regresji liniowej. Jednakże, ponieważ punkty pomiarowe są równomiernie rozmieszczone na osi x, średnia współczynników kierunkowych pomiędzy każdą parą kolejnych punktów jest dokładnie równa współczynnikowi kierunkowemu wyznaczonemu na podstawie całego zbioru danych, co pozwala na pominięcie regresji liniowej w tym szczególnym przypadku. Zatem należy obliczyć współczynniki kierunkowe dla wszystkich sąsiednich punktów za pomocą wzoru:

$$\alpha = \frac{\rho_{n+1} - \rho_n}{T_{n+1} - T_n}$$

gdzie: ρ_n – rezystywność w punkcie n , ρ_{n+1} – rezystywność w punkcie $n+1$. T –

temperatura w punkcie n , T_n – temperatura w punkcie $n+1$. Obliczone współczynniki rezystywności zanotować w tabeli 4. Następnie należy obliczyć wartość średnią a wyniki zanotować w tabeli 5.

Tabela 2. Wymiary próbek materiałów przewodzących

Materiał próbki	Długość l	Średnica d
	m	mm
Miedź	5	0,10
Żelazo	5	0,25
Konstantan	5	0,35

Tabela 4. Wyniki obliczeń współczynników rezystywności

L.P.	Współczynnik rezystywności α		
	Miedź (C)	Żelazo (F)	Konstantan (K)
	$\Omega \cdot m \cdot K^{-1}$	$\Omega \cdot m \cdot K^{-1}$	$\Omega \cdot m \cdot K^{-1}$
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			
9.			
10.			
11.			

Tabela 5. Wyniki obliczeń temperaturowego współczynnika rezystywności

Materiał	Miedź	Żelazo	Konstantan
Współczynnik α			

Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- stronę tytułową,
- schematy układów pomiarowych,
- tabelę wyników pomiarów rezystancji $R(T)$,
- tabelę obliczeń rezystywności $\rho(T)$,
- charakterystyki $\rho(T)$ sporządzone na jednym wykresie,
- tabelę obliczeń wartości współczynnika rezystywności α dla miedzi, żelaza i konstantanu,
- uwagi i wnioski z przeprowadzonych pomiarów.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 2

Pomiar właściwości elektrycznych dielektryków stałych

Lublin 2025 r.

Cel ćwiczenia

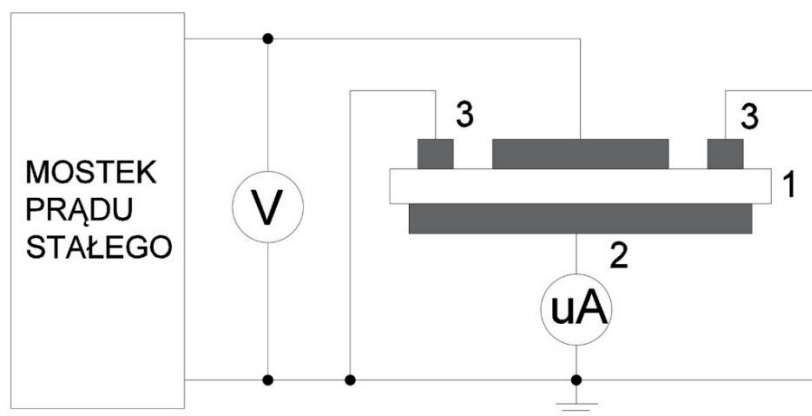
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi właściwościami dielektryków stałych charakteryzujących ich zachowanie pod wpływem pola elektrycznego takimi jak rezystywność skrośna i powierzchniowa, przenikalność dielektryczna oraz tangens kąta strat. Dodatkowo ćwiczenie obejmuje poznanie metod pomiaru parametrów elektrycznych tych materiałów.

Zakres ćwiczenia

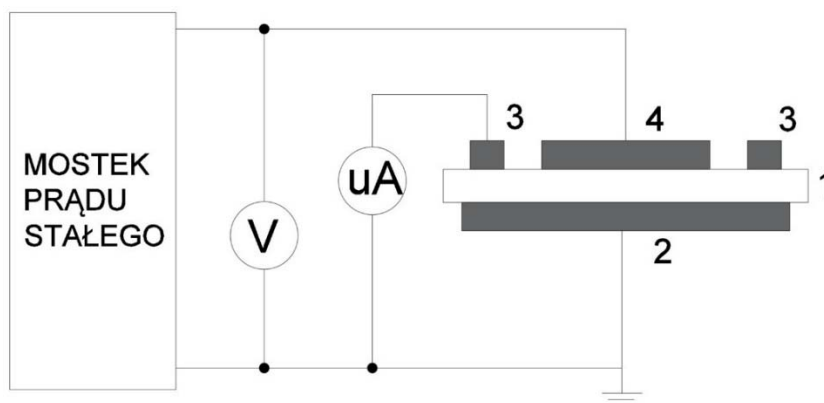
W pierwszej części ćwiczenia badania zostaną przeprowadzone poprzez pomiar rezystancji skrośnej i powierzchniowej pięciu próbek dielektryków stałych wykonanych z różnych materiałów przy pomocy mostka STATRON HMB-1. Następnie w celu poprawnego obliczenia parametrów elektrycznych zmierzone zostaną wymiary geometryczne próbek. Na podstawie pomiarów właściwości elektrycznych oraz geometrycznych obliczona zostanie rezystywność skrośna i powierzchniowa próbek. W drugiej części ćwiczenia przy pomocy kondensatora pomiarowego i mostka RLC zmierzona zostanie pojemność oraz tangens strat dielektrycznych próbek dielektryków wykonanych z trzech różnych dielektryków o różnej grubości. Na podstawie badań pojemności obliczona zostanie przenikalność elektryczna próbek.

Stanowisko pomiarowe

W celu obliczenia rezystywności dielektryków należy dokonać pomiaru rezystancji skrośnej i powierzchniowej w układach przedstawionych na rysunkach 1 i 2.

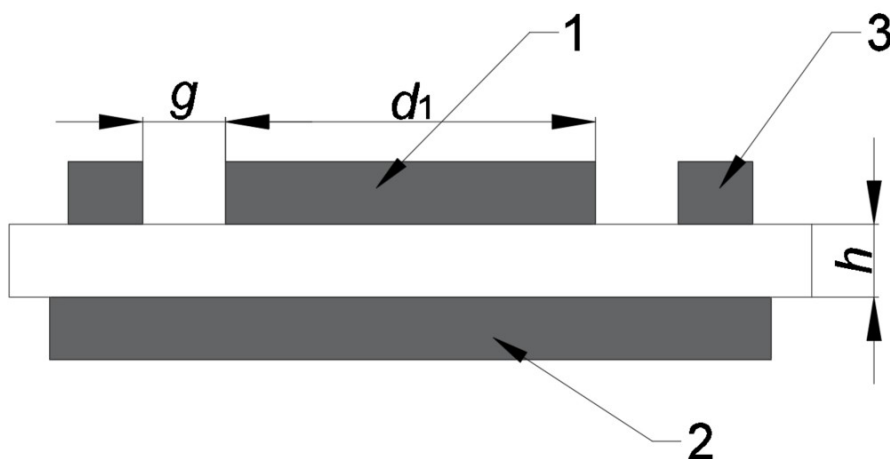


Rysunek 1. Pomiar rezystancji skrośnej: 1 - próbka, 2 - elektroda dolna, 3 - elektroda ekranująca



Rysunek 2. Pomiar rezystancji powierzchniowej: 1 - próbka, 2 - elektroda dolna, 3 - elektroda ekranująca, 4 - elektroda górna

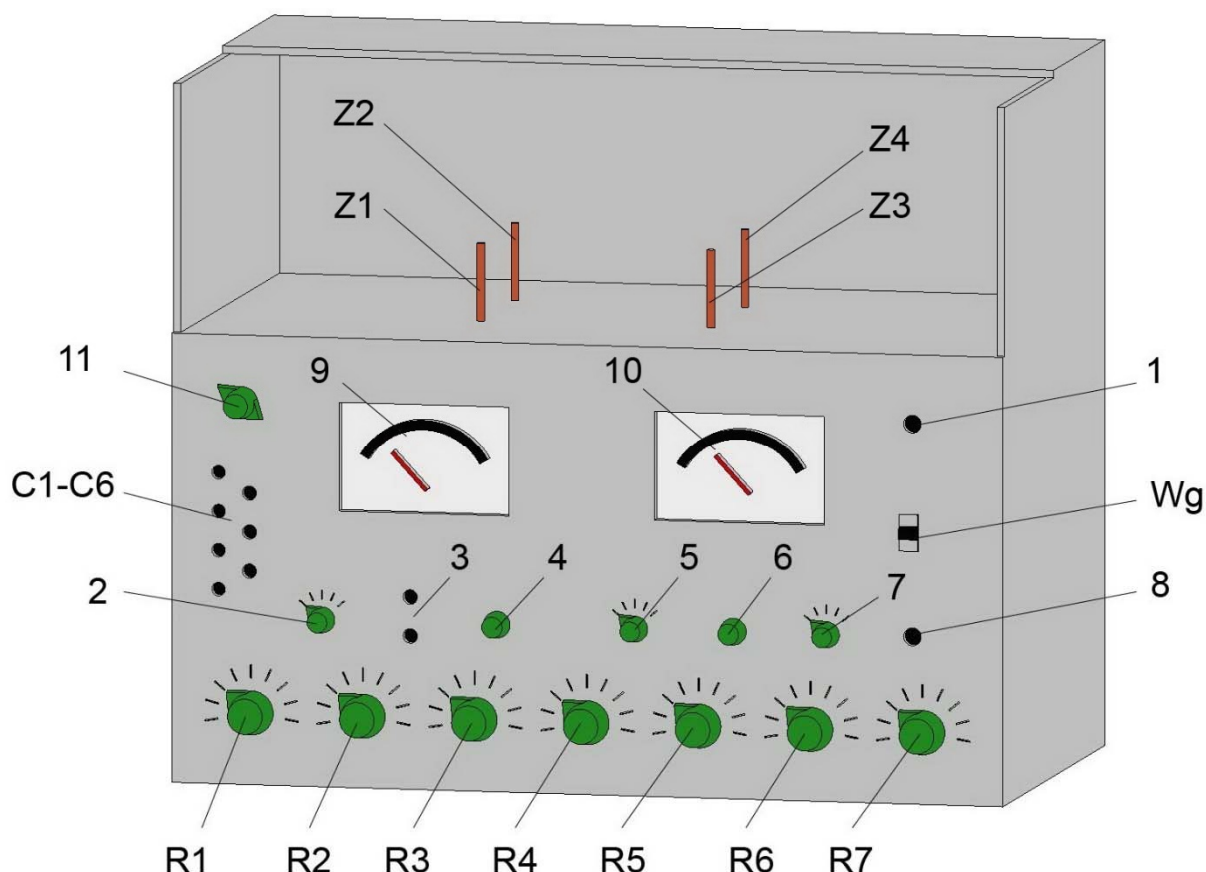
Pomiary rezystancji należy przeprowadzić w trójelektrodowym układzie elektrod płaskich (rysunek 3).



Rysunek 3. Elektrody do pomiaru rezystancji skośnej i powierzchniowej: 1 - elektroda pomiarowa (d_1), 2 - elektroda napięciowa (pomiar rezystancji skośnej), elektroda ochronna (pomiar rezystancji powierzchniowej), 3 - elektroda ochronna (pomiar rezystancji skośnej), elektroda napięciowa (pomiar rezystancji powierzchniowej), g - szerokość przerwy między elektrodami, h - grubość próbki

Budowa mostka pomiarowego

Na rysunku 4 przedstawiono widok mostka pomiarowego do badania rezystancji dielektryków STATRON HMB-1. Do zacisków Z1, Z2, Z3, Z4 przytwierdza się płytę, na której umieszczono badaną próbkę dielektryka (rysunek 5).

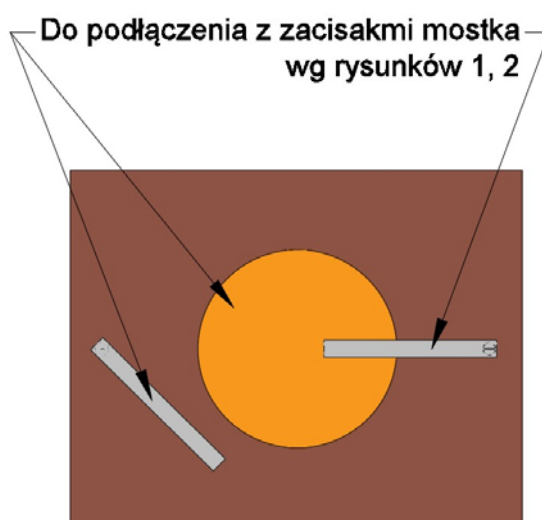


Rysunek 4. Mostek do badania rezystancji skrośnej i powierzchniowej

Mostek obsługuje się poprzez następujące przełączniki:

- W_G – wyłącznik główny,
- (1) – lampka sygnalizacyjna dla W_G ,
- (2) – przełącznik czułości $10000 \div 1$ mV, wychylenie końcowe,
- (3) – regulator punktu zerowego zgrubny,
- (4) – regulator punktu zerowego dokładny,
- (5) – przełącznik zakresu pomiarowego U_p : 3, 10, 30, 100, 300, 1000 V,
- (6) – regulator dokładny napięcia pomiarowego
- (7) – przełącznik polaryzacji,
- (8) – przełącznik pomiarowy (obrotowy) służący do resetowania przyrządu,
- (9) – wskaźnik zera
- (10) – wskaźnik napięcia pomiarowego,

- (11) – przełącznik rodzaju pracy (od lewej): pomiar, kontrola rezystancji R_n , sprawdzenie (cechowanie) rezystancji R_n , pomiar poza ekranem,
- (R1) – przełącznik zakresów rezystancji R_n ,
- (R2-R7) – dekady rezystancyjne,
- (Z1) – zacisk obiektu pomiarowego R_x , wejście wysokoomowe,
- (Z2) – zacisk obiektu pomiarowego R_x , wejście wysokoomowe,
- (Z3) – zacisk obiektu pomiarowego, przyłączenie napięcia,
- (Z4) – zacisk służący do podłączenia ekranu.
- (C1-C6) – regulatory cechowania R1,



Rysunek 5. Płyta do umieszczania próbek materiałów podczas badania rezystancji.

Wykonanie ćwiczenia

Pomiary rezystancji dielektryków

W celu zbadania rezystywności dielektryków należy wykonać pomiar rezystancji skrośnej i powierzchniowej w temperaturze otoczenia dla następujących materiałów dielektrycznych:

- Teflon,
- Laminat-żywica,
- Getynaks,
- Pleksa.

Do wykonania pomiarów wykorzystuje się mostek przedstawiony na rysunku 3.

1. Ustaw przełączniki w następujące pozycje:
 - przełącznik 2: **10 000**,
 - przełącznik R1: **lewy skrajny**,
 - przełącznik 11: **lewy skrajny**,
 - przełącznik R3: na wartość „**1**” (dekada rezystancyjna $\times 100$),
 - przełącznik 5: **30 V**,
 - przełącznik 7: w pozycji „**+**”,
 - przełącznik 8: w pozycji „**0**”.
2. Otworzyć pokrywę mostka pomiarowego i podłączyć zaciski pomiarowe badanej próbki do zacisków (**Z1**), (**Z2**) oraz (**Z3**) według schematu na rysunku 1/rysunku 2 w zależności od mierzonej rezystancji (skrośna/powierzchnowa).
3. Uruchom mostek przyciskiem **W_G**, powinna zapalić się lampka kontrolna (**1**).
4. W celu ustawienia zera elektrycznego wykorzystując pokrętko (**4**) wyskaluj wskazanie miernika (**9**) tak aby wskazywał „**0**”, każdorazowo zmieniając czułość pokrętkiem (**2**) (od 10 000 do 1).
5. Po ustawieniu zera elektrycznego przełącznik (**8**) wciśnij i obróć o 90° do pozycji „**pomiar**”.
6. Ustawić zakres napięciowy na **1000V** pokrętkiem (**5**). Zakres odpowiada wartości skali na woltomierzu (**10**).
7. Ustawić napięcie **600V** potencjometrem (**6**).
8. Następnie należy zrównoważyć mostek poprzez zmianę wartości rezystancji **R_n** na rezystorze dekadowym oraz wykorzystując pokrętła (**R2-R7**) tak aby uzyskać najmniejsze wychylenie na galwanometrze (**9**). Ważne jest aby uwzględnić ustawiony zakres czułości (**2**) i unikać zmian dekad rezystancyjnych o wartościach znacznie wyższych lub znacznie niższych od ustawionego zakresu.
9. Po wyzerowaniu mostka należy zwiększyć czułość pokrętkiem (**2**), a następnie ponownie wyzerować układ.
10. Krok 8 i 9 powtórzyć aż do uzyskania pomiaru przy najwyższej możliwej czułości.

11. Po zakończeniu pomiaru rezystancji należy przełączyć (2) w pozycję **10000**, ustawić wartość napięcia potencjometrem (6) na minimum, a następnie zakres napięciowy (5) na **3V** i wyłączyć urządzenie. Wynik należy zanotować w tabeli 1.
12. Następnie należy dokonać manipulacji układu w celu zmiany mierzonej wartości rezystancji z powierzchniowej na skrośną według rysunku 2, lub wymianę próbki i rozpocząć proces pomiaru od pkt. 6.
13. Po zmierzeniu wszystkich pięciu próbek dielektryków upewnij się że:
 - przełącznik (8) jest w pozycji „0”,
 - przełącznik (2) jest w pozycji **10000**,
 - przełącznik (5) jest w pozycji **3V**,
 - przełączniki (R2) i (R3) są w pozycji **1**.

Uwagi:

- w celu uniknięcia uszkodzenia mostka nie wolno doprowadzić do ustawienia obu najwyższych dekad rezystancji (x100, x1000) w pozycje 0,
- przy wyższych zakresach rezystancji i mniejszej czułości (2) = 100, 10, 1 mogą występować oscylacje utrudniające precyzyjne ustawienie dekad. W takim przypadku zakończ pomiar na niższej czułości.

Przykładowy odczyt z przełączników dekadowych:

$$R_1 = 10^8; R_2 \times 1000 = 4; R_3 \times 100 = 1; R_4 \times 10 = 5; R_5 \times 1 = 1; R_6 \times 0,1 = 1;$$

$$R_7 \times 0,01 = 8$$

Całkowita rezystancja jest równa:

$$R = R_n \cdot R_d = 10^8 \cdot 4151,18 = 4,15118 \cdot 10^{11} \Omega,$$

gdzie: R_n - przełącznik R1, R_d – pozostałe przełączniki (R2-R7)

Po przeprowadzeniu pomiarów rezystancji należy zmierzyć wymiary geometryczne próbek co umożliwi obliczenie wartości rezystywności materiałów. Wymiary zanotować w tabeli 2.

Tabela 1. Wyniki pomiarów i obliczeń rezystancji oraz rezystywności skrośnej i powierzchniowej próbek

Materiał	R_v	R_s	ρ_v	ρ_s
	[Ω]	[Ω]	[$\Omega \cdot m$]	[$\Omega \cdot m$]
Teflon 1				
Teflon 2				
Laminat				
Getynaks				
Plekxa				

Tabela 2. Wymiary geometryczne próbek

Materiał	h	d_1	g	A	B
	[m]	mm	mm	[m ²]	[m]
Teflon 1					
Teflon 2					
Laminat					
Getynaks					
Plekxa					

Oznaczenia w tabelach 1 i 2:

R_v – rezystancja skrośna próbki,

R_s – rezystancja powierzchniowa próbki,

ρ_v – rezystywność skrośna próbki,

ρ_s – rezystywność skrośna próbki,

h – grubość próbki,

d_1 – średnica elektrody pomiarowej (patrz rys. 3),

g – szerokość szczeliny (patrz rys. 3),

A – efektywna powierzchnia w m²,

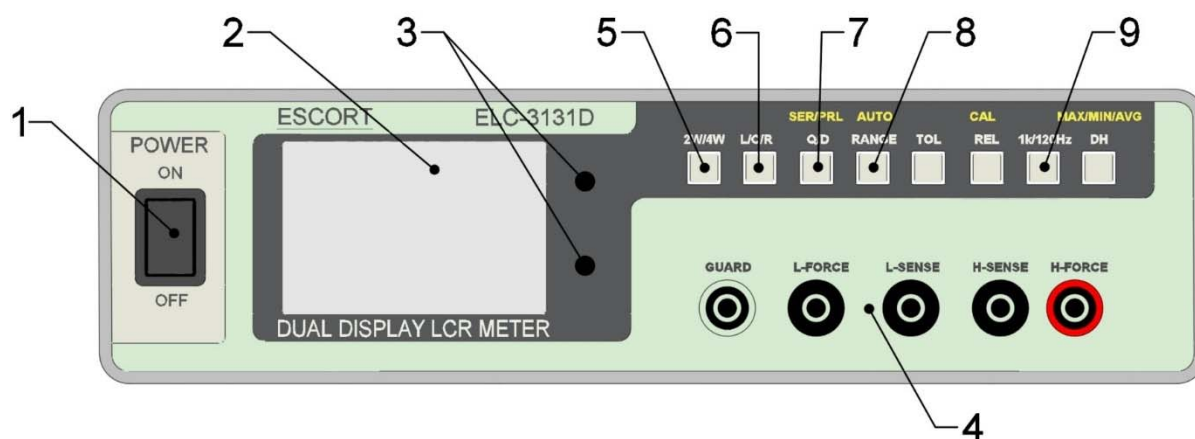
B – efektywna długość elektrody napięciowej w m,

Pomiar pojemności i tangensa kąta strat dielektrycznych

Pomiar przenikalności elektrycznej ϵ oraz tangensa kąta strat dielektrycznych $\tan \delta$ wykonany zostanie dla następujących materiałów dielektrycznych:

- Pleksiglas
- Tekstolit
- Getynaks

Pomiary wartości ϵ i $\tan\delta$ wykonujemy miernikiem ESCORT ELC-3131D przedstawionym na rysunku 6.

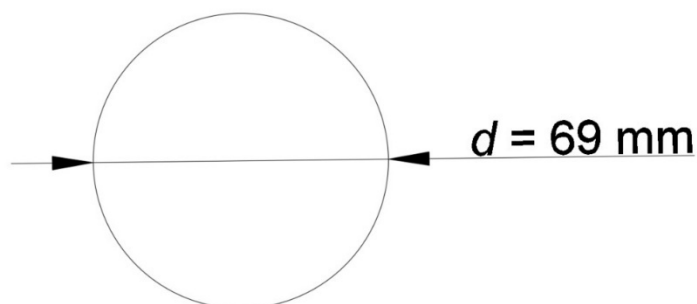


Rysunek 61. Wygląd płyty czołowej miernika ESCORT

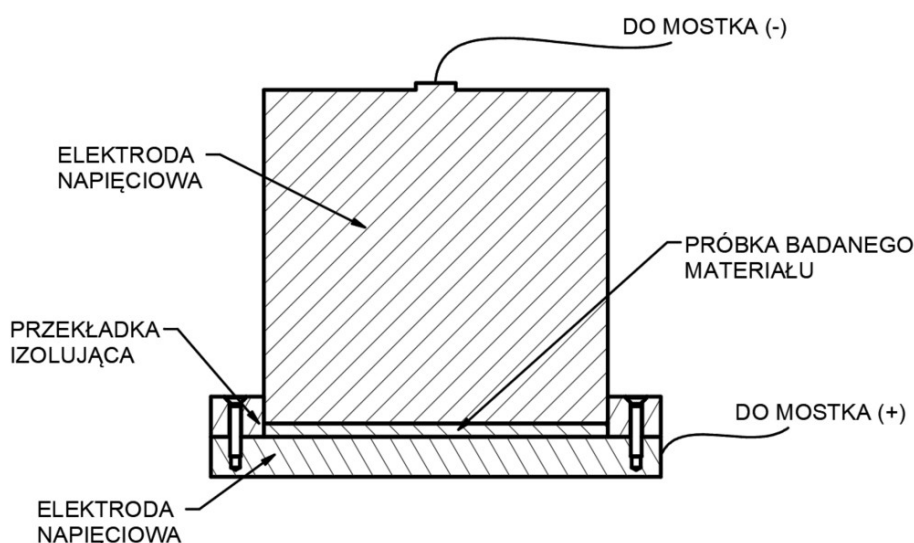
Oznaczenia do rysunku 6:

- 1 – załączanie i wyłączanie,
- 2 – wyświetlacz,
- 3 – wskaźniki przełączników liczby przewodów zasilających układ pomiarowy,
- 4 – gniazda przewodów,
- 5 – przełącznik zmiany przewodów zasilających (2 prądowe, 2 napięciowe),
- 6 – przełącznik badanej wielkości (indukcyjność, pojemność, rezystancja),
- 7 – przełącznik zmiany pomiaru dobroci i kąta stratności próbki,
- 8 – zmiana zakresu,
- 9 – zmiana częstotliwości próbkowania 1 kHz/120 Hz.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono widok próbki dielektryka wraz z jej wymiarami oraz schematu kondensatora pomiarowego wykorzystywanego pomiaru pojemności i tangensa strat dielektrycznych.



Rysunek 7. Widok próbki z góry oraz jej wymiary



Rysunek 8. Kondensator pomiarowy do badania podstawowych właściwości dielektryków stałych

Przeprowadzenie pomiarów:

1. podłączyć mostek do zasilania i uruchomić przyciskiem **1**,
2. po uruchomieniu przełącznikami **6** i **7** należy ustawić mostek na pomiar pojemności i tangensa strat dielektrycznych. Na wyświetlaczu wyświetli się litera **C** i **D**,
3. podłączyć kondensator do zacisków mostka **L-SENSE** i **H-SENSE**,
4. należy umieścić badaną próbkę wewnątrz kondensatora pomiarowego,
5. odczytać wartość pojemności **C** oraz kąta stratności **tgδ** dla częstotliwości **120 Hz** i **1kHz** zmieniając częstotliwość pomiarową przyciskiem **9**,
6. odczytane wartości zanotować w tabeli 3.

Po przeprowadzeniu pomiaru pojemności próbek w celu obliczenia przenikalności

dielektrycznej należy zmierzyć ich grubość i zanotować w tabeli 1. Średnica próbek zgodnie z rysunkiem 7 wynosi 69 mm.

Tabela 3. Wyniki pomiarów pojemności oraz kąta stratności pojedynczych próbek

Materiał	d	C (1 kHz)	C (120 Hz)	$tg\delta$ (1 kHz)	$tg\delta$ (120 Hz)
	[m]	[pF]	[pF]	[-]	[-]
Pleksiglas					
Tekstolit 1					
Tekstolit 2					
Getynaks 1					
Getynaks 2					

Tabela 4. Wyniki obliczeń przenikalności względnej pojedynczych próbek

Materiał	d_1	ϵ_0	S	ϵ (1 kHz)	ϵ (120 Hz)
	[m]	[F/m]	[m ²]	[-]	[-]
Pleksiglas					
Tekstolit 1					
Tekstolit 2					
Getynaks 1					
Getynaks 2					

Oznaczenia w tabelach 3 i 4:

d – średnica próbki,

C – pojemność próbki dla częstotliwości 1 kHz i 120 Hz,

$tg\delta$ – kąt stratności próbki dla częstotliwości 1 kHz i 120 Hz,

d_1 – grubość próbki,

ϵ_0 – przenikalność próżni,

S – powierzchnia próbki,

ϵ – przenikalność względna próbki dla częstotliwości 1 kHz i 120 Hz.

Opracowanie wyników

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów rezystancji skrośnej i powierzchniowej

oraz pojemności próbek należy obliczyć wartości rezystywności oraz przenikalności elektrycznej różnych dielektryków stałych.

Wartości rezystywności skrośnej ρ_V i powierzchniowej ρ_S w tabeli 1 oblicza się ze wzorów:

$$\rho_V = \frac{R_V \cdot A}{h} \quad (1)$$

$$\rho_S = \frac{R_S \cdot B}{g} \quad (2)$$

A – efektywna powierzchnia w m^2 , wg wzoru:

$$A = \frac{\pi(d_1 + g)^2}{4} \quad (3)$$

B – efektywna długość elektrody napięciowej w m, wg wzoru:

$$B = \pi(d_1 + g) \quad (4)$$

gdzie: d_1 – średnica elektrody pomiarowej, g – szerokość szczeliny w m.

Wartości przenikalności elektrycznej ε w tabeli 4 oblicza się ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d_1}{\varepsilon_0 \cdot S} \quad (5)$$

gdzie: C – pojemność z tabeli 3 dla częstotliwości 1 kHz i 120 Hz.

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele z wynikami pomiarów i obliczeń,
- przykładowe obliczenia,
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników z komentarzem.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 3

Badanie materiałów ferromagnetycznych

Lublin 2025 r.

Cel ćwiczenia

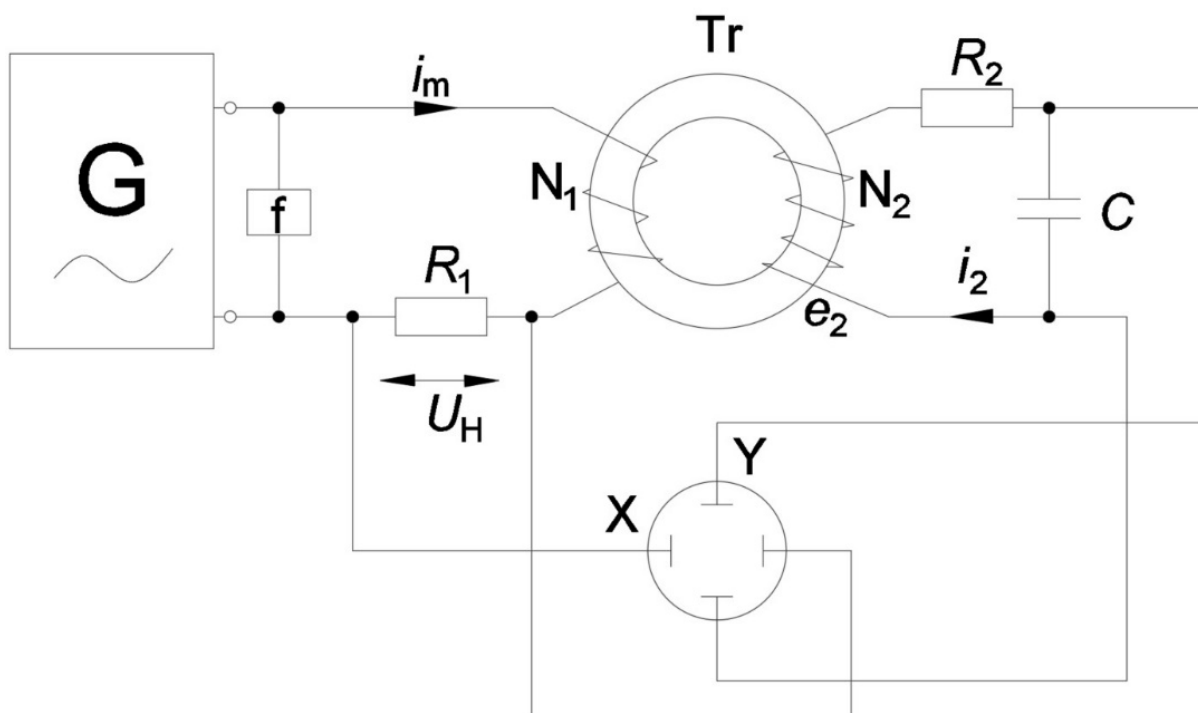
Celem ćwiczenia jest pomiar i analiza podstawowych właściwości magnetycznych różnych materiałów ferromagnetycznych.

Zakres ćwiczenia

W ćwiczeniu zostanie przeprowadzona analiza właściwości magnetycznych trzech materiałów ferromagnetycznych stosowanych w elektrotechnice: ferrytu, blachy transformatorowej oraz blachy przeznaczonej do pracy przy podwyższonej częstotliwości. Na podstawie pętli histerezy wyznaczone zostaną następujące parametry: maksymalna indukcja magnetyczna, maksymalne natężenie pola magnetycznego, indukcja szczątkowa oraz natężenie pola koercji. W oparciu o zmierzone wartości zostanie obliczona względna przenikalność magnetyczna badanych materiałów. Dodatkowo, na ekranie oscyloskopu będą obserwowane zmiany kształtu pętli histerezy w zależności od zmiany amplitudy i częstotliwości sygnału sinusoidalnego.

Stanowisko pomiarowe

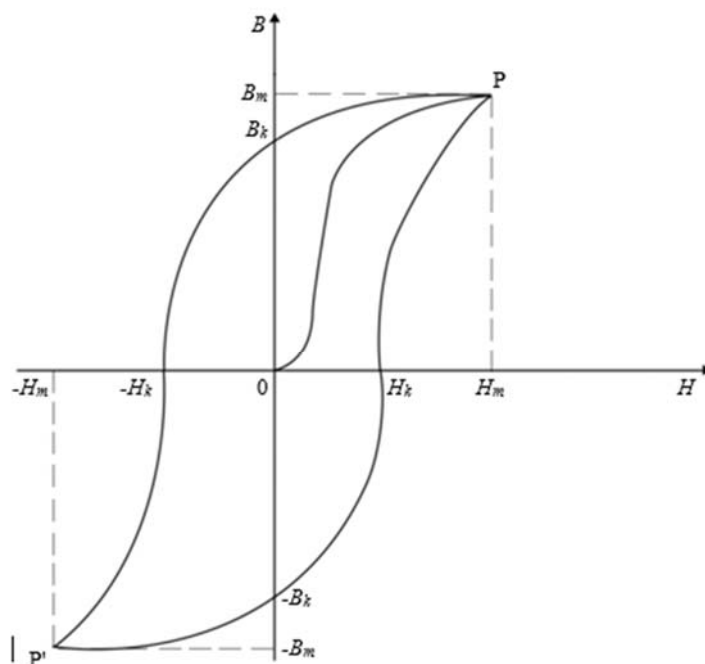
Badania materiałów ferromagnetycznych zostaną przeprowadzone na stanowisku przedstawionym na rysunku 1. Stanowisko składa się z modelu do badania materiałów ferromagnetycznych, który zawiera trzy pary (**N1,N2**) uzwojeń nawiniętych na rdzenie wykonane z badanych w ćwiczeniu ferromagnetyków (**Tr**). Sygnał do badanego układu będzie generowany przez generator przebiegów sinusoidalnych o dużej mocy (**G**). Do obserwacji pętli histerezy wykorzystany zostanie dwukanałowy oscyloskop Protek 3502C (**X, Y**).



Rysunek 1. Układ do pomiaru podstawowych właściwości magnetycznych

Wykonanie ćwiczenia

W celu wykonania ćwiczenia należy zmierzyć przy pomocy oscyloskopu dwukanałowego wartości maksymalnej indukcji magnetycznej, maksymalnego natężenia pola magnetycznego, indukcji koercji oraz natężenia pola koercji. Parametry te mogą zostać odczytane z pętli histerezy magnetycznej której przykładowy wykres przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Pętla histerezy ciała ferromagnetycznego.

Gdzie:

H_m – maksymalne natężenie pola magnetycznego,

B_m – indukcja maksymalna,

B_k – indukcja koercji,

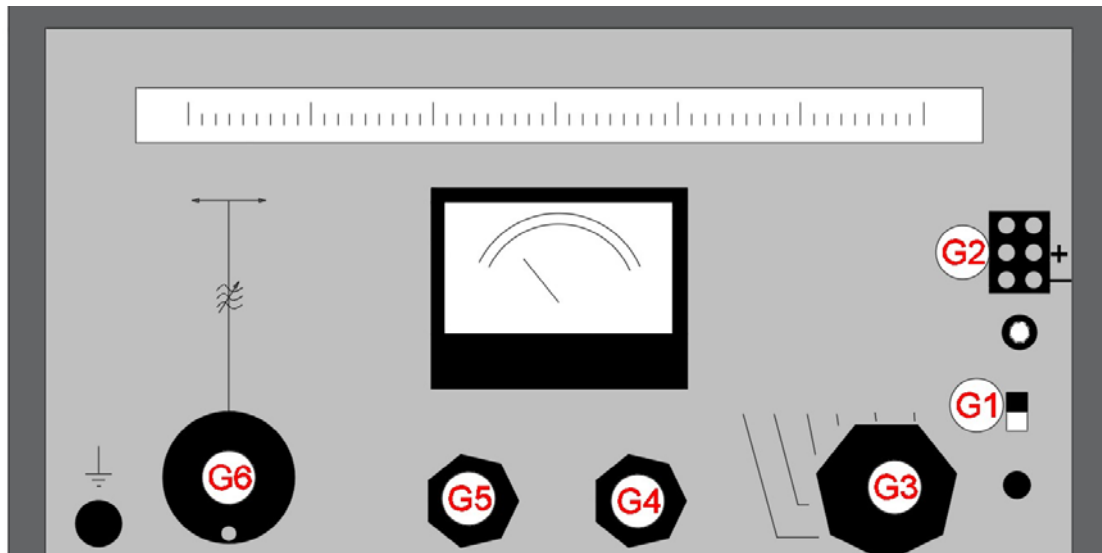
H_k – natężenie pola koercji,

Wykonanie pomiarów

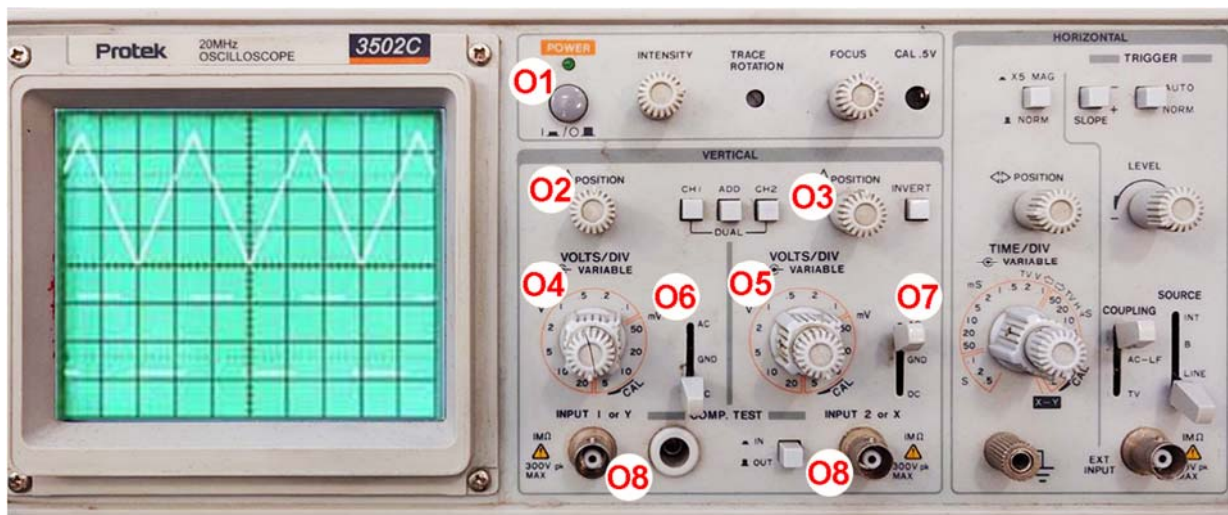
Aby wykonać tę część ćwiczenia, należy postępować zgodnie z poniższymi krokami:

1. Podłączyć układ zgodnie ze schematem (rys. 1):
 - a. Podłączyć model do badania podstawowych właściwości materiałów ferromagnetycznych do odpowiednich kanałów oscyloskopu (**O8**).
 - b. Podłączyć model do wyjścia (**G2**) generatora.
 - c. Podłączyć miernik uniwersalny do wyjścia z generatora i ustawić pomiar częstotliwości.
2. Przełącznikiem znajdującym się na obudowie modelu wybrać badaną próbkę ferromagnetyka.
3. Uruchomić generator (**G1**).
4. Pokrętkiem (**G3**) ustawić odpowiednią dekadę częstotliwości dla danego materiału zgodnie z tabelami 2-4.

5. Ustawić maksymalne wzmocnienie sygnału pokrętkiem (**G5**).
6. Włączyć oscyloskop wyłącznikiem głównym (**O1**).
7. Pokrętkami (**O4**) i (**O5**) ustawić odpowiednie stałe oscyloskopu zgodnie z tabelą 1.
8. Uziemić oba kanały ustawiając przełączniki (**O6**) i (**O7**) w pozycje **GND**.
9. Pokrętkami **POSITION** ustawić plamkę świetlną w punkcie przecięcia osi X (**O2**) i Y (**O3**)
10. Po skalibrowaniu oscyloskopu przełączyć (**O6**) w pozycje **DC**, a (**O7**) w pozycje **AC**.
11. Ustawić odpowiednią częstotliwość sygnału na generatorze za pomocą pokrętła (**G6**) zgodnie z tabelą 4.
12. Amplitudę sygnału należy ustawić pokrętkiem (**G4**) tak aby uzyskać maksymalnie duży, ale nie zniekształcony obraz pętli histerezy na oscyloskopie.
13. Odczytać charakterystyczne wartości z pętli histerezy zgodnie z rys. 2 dla 5 wartości amplitudy i zapisać je w tabeli 2. Pamiętaj, że 1 cm = 1 działka. Wartości te mogą być odczytywane z „jednej połówki” pętli histerezy, gdyż pętla histerezy jest krzywą symetryczną.
14. Zmienić wartość częstotliwości sygnału i powtórzyć pomiary zgodnie z punktami 11 – 13.
15. Po wykonaniu pomiaru przy dwóch częstotliwościach dla danej próbki należy zmienić badany materiał, ustawić odpowiednie wartości częstotliwości i powtórzyć pomiary.



Rysunek 3. Schemat płyty czołowej generatora przebiegów sinusoidalnych



Rysunek 4. Fotografia płyty czołowej oscyloskopu Protek 3502C.

Tabela 1. Charakterystyczne parametry badanych ferromagnetyków.

V_x	V_y	R_1	R_2	N_1	N_2	C	S	l_{sr}
V/cm	V/cm	Ω	Ω	-	-	μF	m^2	m
Blacha transformatorowa								
0,1	0,1	4,7	910	300	60	20	0,00054	0,102
Feryt								
0,05	0,05	4,7	90	360	48	20	0,0002	0,091
Blacha na podwyższone częstotliwości								
0,1	0,1	4,7	910	480	32	20	0,0003	0,102

Oznaczenia w tabeli 1:

- V_x – stała oscyloskopu odchyłania poziomego,
- V_y – stała oscyloskopu odchyłania pionowego,
- R_1 – rezystancja rezystora wejściowego,
- R_2 – rezystancja rezystora po stronie wtórnej,
- I_{sr} – średnia droga strumienia magnetycznego,
- S – pole przekroju poprzecznego próbki,
- N_1 – uzwojenie pierwotne próbki,
- N_2 – uzwojenie wtórne próbki,
- C – pojemność kondensatora.

Tabela 2. Wyniki pomiarów właściwości magnetycznych ferrytu .

Ferryt										
L.p.	f	B_m	H_m	B_k	H_k	B_m	H_m	B_k	H_k	μ
	kHz	dz	dz	dz	dz	T	A/m	T	A/m	-
1.	1,2									
2.										
3.										
4.										
5.										
6.	1,5									
7.										
8.										
9.										
10.										

Tabela 3. Wyniki pomiarów właściwości magnetycznych blachy transformatorowej.

Blacha transformatorowa										
L.p.	f	B_m	H_m	B_k	H_k	B_m	H_m	B_k	H_k	μ
	Hz	dz	dz	dz	dz	T	A/m	T	A/m	-
1.	50									
2.										
3.										
4.										
5.										
6.	60									
7.										
8.										
9.										
10.										

Tabela 4. Wyniki pomiarów właściwości magnetycznych blachy na podwyższonej częstotliwości

Blacha na podwyższonej częstotliwości										
L.p.	f	B_m	H_m	B_k	H_k	B_m	H_m	B_k	H_k	μ
	Hz	dz	dz	dz	dz	T	A/m	T	A/m	-
1.	100									
2.										
3.										
4.										
5.										
6.	120									
7.										
8.										
9.										
10.										

Oznaczenia w tabelach 2-4:

B_m – maksymalna indukcja magnetyczna,

H_m – maksymalne natężenie pola magnetycznego,

B_k – indukcja koercji,

H_k – natężenie koercji,

Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników pomiaru należy obliczyć wartości natężenia pola magnetycznego, indukcji magnetycznej B oraz przenikalności magnetycznej μ . Zgodnie z wzorami (1)-(3) Wyniki obliczeń zanotować w tabelach 2-4.

$$H = \frac{N_1(V_x U_x)}{R_1 l_{sr}}, \quad (1)$$

$$B = \frac{R_2 C(V_y U_y)}{N_2 S} \quad (2)$$

$$M = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \quad (3)$$

$$M_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (4)$$

gdzie:

U_x, U_y – działki odczytane z oscyloskopu.

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni.

Na podstawie obliczeń należy wykonać osobne wykresy zależności indukcji magnetycznej B oraz przenikalności magnetycznej μ od natężenia pola magnetycznego H , dla trzech próbek materiałów magnetycznych dla obu częstotliwości pomiarowych

Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- Schemat układu pomiarowego,

- Tabele pomiarów wraz z obliczeniami,
- Wykresy zależności $B = f(H)$,
- Wykresy zależności $\mu = f(H)$,
- Przykładowe obliczenia,
- Uwagi i wnioski dotyczące ćwiczenia.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 4

Porównanie wytrzymałości dielektrycznej powietrza, oleju mineralnego i jego ekologicznych alternatyw

Lublin 2025 r.



Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest:

- określenie wpływu odległości międzyelektrodowej na wytrzymałość powietrza,
- określenie wpływu odległości międzyelektrodowej na wytrzymałość izolacyjnego oleju mineralnego,
- określenie wpływu odległości międzyelektrodowej na wytrzymałość biodegradowalnego oleju mineralnego,
- porównanie wytrzymałości dielektrycznej powietrza, oleju mineralnego oraz biodegradowalnego oleju mineralnego.

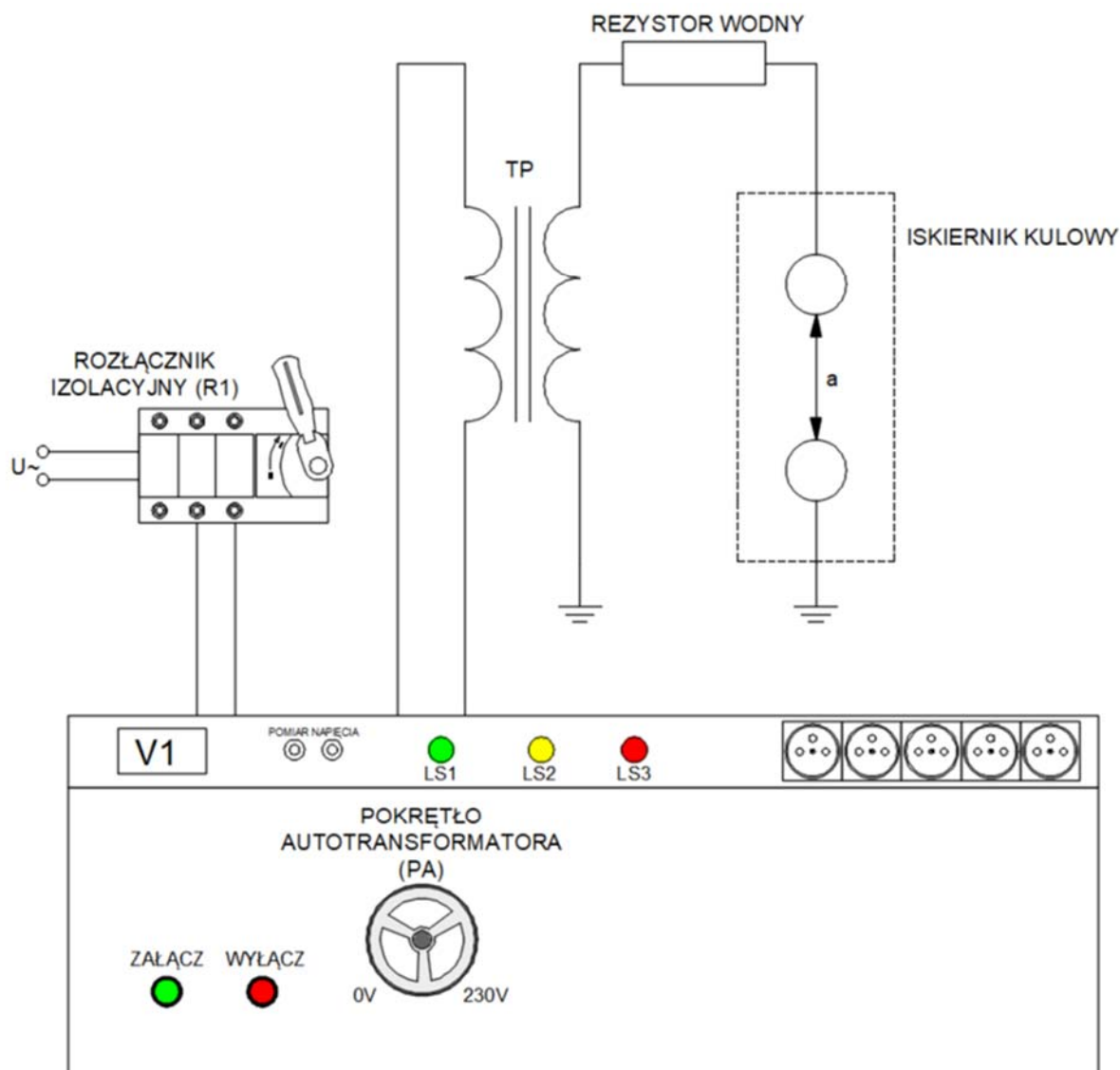
Zakres ćwiczenia

W ramach ćwiczenia zostaną przeprowadzone pomiary napięcia przebicia powietrza w zależności od odległości międzyelektrodowej dla układu z elektrodami kulowymi. Na podstawie uzyskanych wyników zostanie określona charakterystyka zależności napięcia przebicia powietrza od odległości międzyelektrodowej $U=f(a)$. Ponadto, przeprowadzone zostaną badania napięcia przebicia izolacyjnego oleju mineralnego oraz jego ekologicznej alternatywy, tj. biodegradowalnego oleju izolacyjnego, w funkcji odległości międzyelektrodowej. Na tej podstawie zostaną wyznaczone zależności napięcia przebicia dla badanych cieczy izolacyjnych. Ćwiczenie umożliwi analizę i porównanie wytrzymałości dielektrycznej powietrza, oleju mineralnego oraz jego biodegradowalnej alternatywy.

Wykonanie ćwiczenia

1. Pomiar napięcia przebicia powierza w zależności od odległości międzyelektrodowej

W celu wyznaczenia napięcia przebicia powietrza w zależności od odległości międzyelektrodowej wykorzystujemy stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Układ pomiarowy do badania wytrzymałości elektrycznej powietrza w zależności od odległości międzyelektrodowej.

UWAGA!

Badanie napięcia przebicia powietrza w zależności od odległości międzyelektrodowej wykonuje się przy użyciu napięcia strony pierwotnej transformatora bierczego regulowanego autotransformatorem w zakresie od 0 V do 230 V. Pomiar przeprowadzić w układzie elektrod kulowych o średnicy 12,5 cm dla odstępów w granicach od 5 do 50 mm, zmieniając odstęp co 5 mm. Ze względu na specyfikę pomiaru, do przeprowadzenia badania niezbędna jest obecność osoby prowadzącej ćwiczenie, w celu poinstruowania osób wykonujących ćwiczenie. Aby wykonać tę

część ćwiczenia, należy postępować zgodnie z poniższymi krokami:

1. Upewnić się, że napięcie w układzie jest wyłączone (na stole pomiarowym świeci się jedynie „Zielona lampka” (**LS1**), a **transformator probierczy (TP) jest uziemiony** (drażek uziemiający umieszczony jest na transformatorze probierczym).
2. Następnie wejść do celki pomiarowej i zmienić odległość między elektrodami kulowymi na odległość w zakresie od **5 mm do 50 mm** (odległości dla których należy dokonać pomiarów wykazano w tabeli 1).
3. Po ustawieniu zadanej odległości na iskierniku kulowym, umieścić drażek uziemiający na „haku”, przed wejściem do celki.
4. Ustawić rozłącznik (**R1**) w pozycji „1” (zamknięty). Na stole pomiarowym zapali się żółta lampka sygnalizacyjna (**LS2**). W chwili obecnej powinny świecić się dwie lampki sygnalizacyjne, zielona (**LS1**) oraz żółta (**LS2**).
5. Następnie pokrętko autotransformatora (**PA**) obrócić w lewo (na wartość 0).
6. Włącz napięcie za pomocą przycisku „**ZAŁĄCZ**”, na stole pomiarowym. Na stanowisku pomiarowym zapali się czerwona lampka (**LS3**). W tym momencie powinny świecić się trzy lampki sygnalizacyjne, zielona (**LS1**), żółta (**LS2**) oraz czerwona (**LS3**).
7. Za pomocą pokrętki autotransformatora (**PA**) powoli zwiększać wartość napięcia, jednocześnie monitorując wskazania woltomierza **V1**. Napięcie należy zwiększać ze stałą prędkością w zakresie 1–2 kV/s, aż do momentu wystąpienia przebiccia.
8. Odczytać wartość napięcia, przy której doszło do przeskoku pomiędzy elektrodami kulowymi. Po wystąpieniu przebiccia układ pomiarowy automatycznie się wyłączy (zadziałanie zabezpieczenia nadprądowego), a czerwona lampka (**LS3**) zgaśnie. W tej chwili powinny pozostać włączone dwie lampki sygnalizacyjne: zielona (**LS1**) oraz żółta (**LS2**).
9. Pomiar dla każdej ustalonej odległości między elektrodami należy powtórzyć trzykrotnie, rozpoczynając od procedury opisanej w punkcie 5.
10. Po zakończeniu trzech pomiarów napięcia przeskoku dla jednej odległości, należy ustawić rozłącznik (**R1**) w pozycji „0” (rozłącznik otwarty). Na stole pomiarowym zgaśnie żółta lampka sygnalizacyjna (**LS2**), świeci jedynie

zielona lampka (LS1).

11. Otworzyć drzwi celki pomiarowej, umieścić drążek uziemiający na transformatorze, aby zapewnić jego bezpieczne uziemienie.
12. Powtórzyć pełny cykl pomiarowy dla kolejnej odległości między elektrodami, rozpoczynając od punktu 1.
13. Przeprowadzić pomiary napięcia przeskoku powietrza dla różnych odległości międzyelektrodowych, zapisując uzyskane wyniki w tabeli 1.
14. Po zakończeniu pomiarów odczytać z lokalnej stacji pogodowej znajdującej się w laboratorium aktualne warunki atmosferyczne, takie jak:
 - temperatura otoczenia: $T = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$
 - ciśnienie atmosferyczne: $p_{\text{atm}} = \dots\dots\dots\text{hPa}$
 - wilgotność względna: $\phi = \dots\dots\dots\%$

Tabela 5. Wyniki pomiarów napięcia przeskoku w powietrzu

L.p.	a [mm]	U_p [V]	U_{psr} [kV _m]	U_p [kV _m]	U_{pn} [kV _m]	E_p [kV _m /mm]
1	5					
2						
3						
4	10					
5						
6						
7	15					
8						
9						
10	20					
11						
12						
13	25					
14						
15						
16	30					
17						

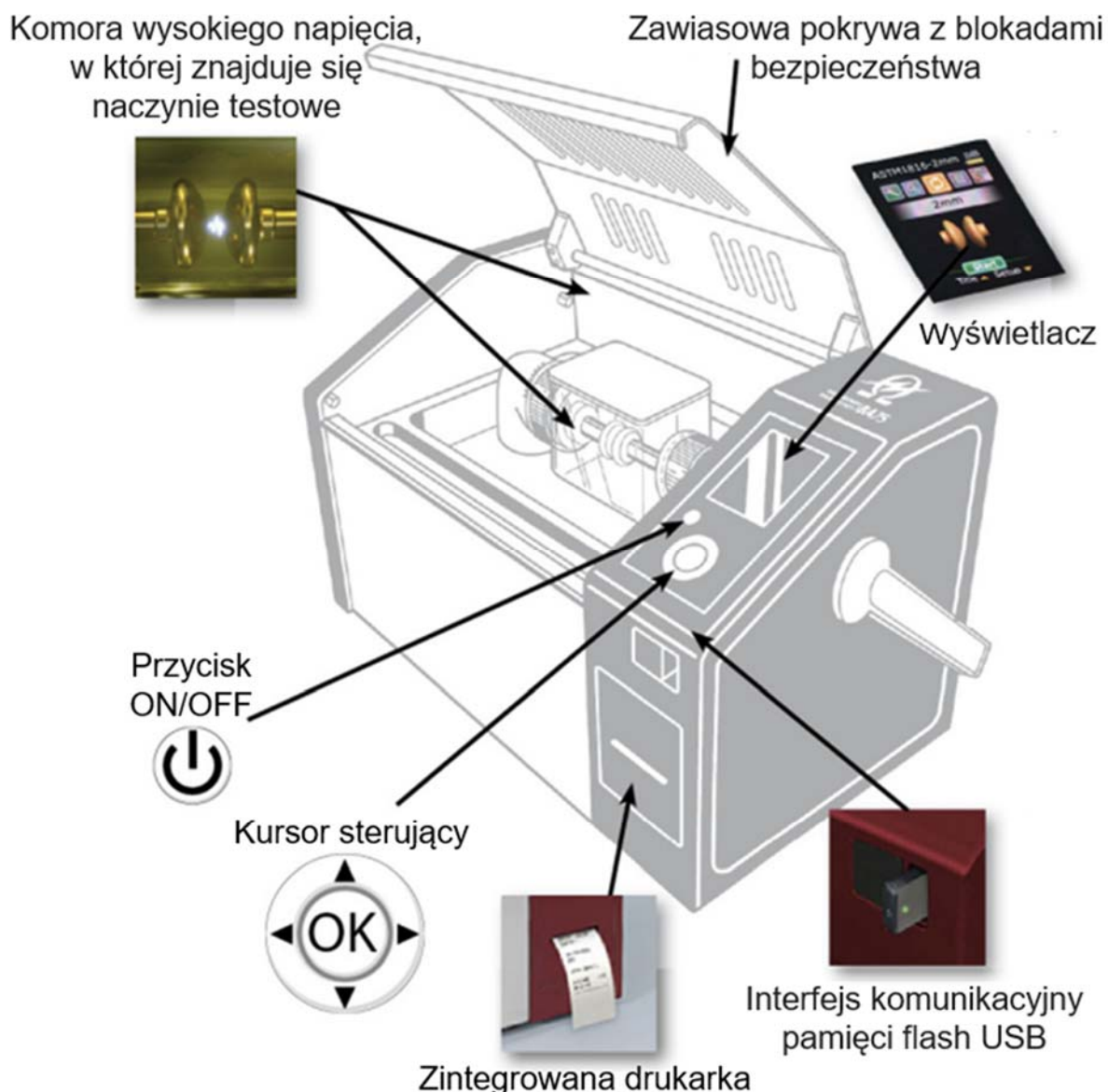
18						
19	35					
20						
21						
22	40					
23						
24						
25	45					
26						
27						
28	50					
29						
30						

Oznaczenia w tabeli:

- a - odległość międzyelektrodowa,
- u_p - napięcie na uzwojeniu pierwotnym transformatora probierczego, przy którym zachodzi przebiecie, odczytane z woltomierza,
- U_{psr} - wartość średnia napięcia na uzwojeniu pierwotnym transformatora probierczego, przy którym zachodzi przebiecie,
- U_p - wartość średnia napięcia przebiecia,
- U_{pn} - wartość średnia napięcia przebiecia w warunkach normalnych,
- E_p - natężenie pola elektrycznego odpowiadające napięciu przebiecia.

2. Pomiar napięcia przebiecia płynów elektroizolacyjnych w zależności od odległości międzyelektrodowej

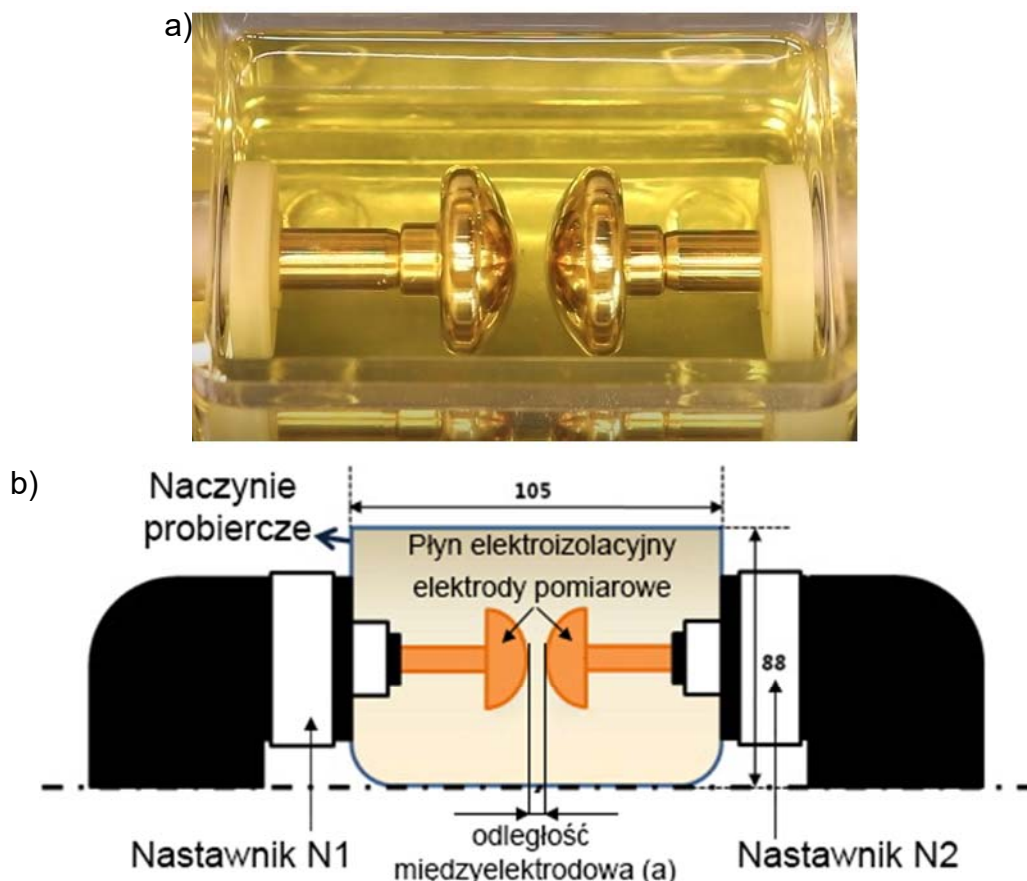
Do wyznaczenia napięcia przebiecia płynów elektroizolacyjnych, takich jak olej mineralny i biodegradowalny olej mineralny, w zależności od odległości międzyelektrodowej wykorzystuje się **Analizator napięcia przebiecia oleju BA75/100**, którego schemat przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Analizator napięcia przebicia oleju BA75/100 wykorzystany do badania napięcia przebicia oleju izolacyjnego w zależności od odległości międzyelektrodowej.

Zgodnie z wymaganiami norm ASTM 1816 oraz IEC 60156 badania napięcia przebicia oleju przeprowadza się w układzie elektrod kulistych. Elektrody są fragmentami kul (czaszami) o średnicy 36 mm umieszczonymi w naczyniu probierczym.

Pomiary napięcia przebicia oleju należy wykonać dla odstępów międzyelektrodowych w granicach od 0,5 do 4 mm, zmieniając odstęp co 0,5 mm. Do badań wykorzystuje się układ elektrod przedstawiony na rysunku 3, w którym regulacja odległości między elektrodami odbywa się za pomocą nastawników (N1, N2).



Rys. 3. Układ elektrod do badania wytrzymałości oleju, a) zdjęcie naczynia probierczego, b) schematyczny przekrój naczynia probierczego.

Procedura wykonania pomiarów napięcia przebicia płynów elektroizolacyjnych:

1. Włącz analizator napięcia przebicia, naciskając przycisk **ON/OFF** na panelu frontowym.
2. Odczekaj kilka sekund, aż na ekranie urządzenia pojawi się numer wersji oprogramowania (FIRMWARE) oraz inne informacje techniczne związane z analizatorem.
3. Poczekaj na zakończenie procedury samokontroli, która sprawdza poprawność działania urządzenia i zasilania.
4. Otwórz pokrywę bezpieczeństwa i umieść naczynie probiercze z badanym płynem elektroizolacyjnym (np. olej mineralny) w komorze probierczej.
5. Zdejmik blokadę nastawników (czerwone dzwignie).
6. Za pomocą nastawników **N1** i **N2** (rysunek 3) ustaw odległość między

elektrodami zgodnie z wartością zapisaną w tabeli 1.

7. Upewnij się, że elektrody są całkowicie zanurzone w badanym płynie elektroizolacjom, a następnie zamknij pokrywę bezpieczeństwa.
8. Na ekranie analizatora, korzystając z przycisków **Góra/Dół**, wybierz opcję **Pojedynczy test** i zatwierdź przyciskiem **OK**.
9. Użyj strzałek **Góra/Dół** oraz **Prawo/Lewo** wprowadź następujące parametry próby:
 - **Rozkład elektrod („Odstęp”)**: zgodnie z odległością ustaloną w punkcie 5.
 - **Liczba prób („Liczyć”)**: ustaw na wartość **5**.
 - **Szybkość narastania napięcia („Najazd”)**: ustaw na **2.0 kV/s**.
 - **Maksymalna wartość napięcia („Napięcie”)**: ustaw na **100 kV**.
10. Rozpocznij pomiar, wybierając opcję **Start próby** i potwierdzając ją przyciskiem **OK**.
11. Analizator przeprowadzi cykl probierczy, automatycznie wykrywając i rejestrując napięcie przebicia w momencie wystąpienia przeskoku elektrycznego oraz nastąpi automatyczne mieszanie oleju przy pomocy mieszadła magnetycznego.
12. Po wykonaniu wszystkich prób cykl probierczy kończy się. Wyniki prób zostaną wyświetlone na ekranie urządzenia. Zapisz je w tabeli 2.
13. Wyciśnij ponownie przycisk **OK**.
14. Otwórz pokrywę bezpieczeństwa i powtórz procedurę dla kolejnej odległości między elektrodami, rozpoczynając od punktu 5.
15. Po zakończeniu pomiarów dla oleju mineralnego, wykonaj pomiary dla biodegradowalnego oleju mineralnego, postępując zgodnie z procedurą od punktu 4.
16. Po wykonaniu wszystkich pomiarów wyłącz analizator, naciskając przycisk **ON/OFF**.

Wyniki pomiarów należy umieścić w tabelach, a następnie wykorzystać je do sporządzenia charakterystyk i opracowania wniosków.

Tabela 6. Wyniki pomiarów napięcia przebicia oleju

L.p.	Olej mineralny				Biodegradowalny olej mineralny		
	a [mm]	U_{pom} [kV]	$U_{pom\acute{s}r}$ [kV _m]	E_{pom} [kV _m /mm]	U_{pbom} [kV]	$U_{pbom\acute{s}r}$ [kV _m]	E_{pbom} [kV _m /mm]
1.	0,5						
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.	1,0						
8.							
9.							
10.							
11.							
12.							
13.	1,5						
14.							
15.							
16.							
17.							
18.							
19.	2,0						
20.							
21.							
22.							
23.							
24.							
25.	2,5						
26.							
27.							
28.							
29.							
30.							
31.	3,0						
32.							
33.							
34.							
35.							
36.							

37.	3,5						
38.							
39.							
40.							
41.							
42.							
43.	4,0						
44.							
45.							
46.							
47.							
48.							

Oznaczenia w tabeli:

- a - odległość międzyelektrodowa,
- U_{pom} - napięcie przebicia dla oleju mineralnego,
- $U_{pom\bar{s}r}$ - wartość średnia napięcia przebicia dla oleju mineralnego,
- E_{pom} - natężenie pola elektrycznego odpowiadające napięciu przebicia (wytrzymałość dielektryczna) dla oleju mineralnego,
- U_{pbom} - napięcie przebicia dla biodegradowalnego oleju mineralnego,
- $U_{pbom\bar{s}r}$ - wartość średnia napięcia przebicia dla biodegradowalnego oleju mineralnego,
- E_{pbom} - natężenie pola elektrycznego odpowiadające napięciu przebicia (wytrzymałość dielektryczna) dla biodegradowalnego oleju mineralnego,

Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników należy przeprowadzić następujące obliczenia oraz wykonać wykresy zgodnie z poniższymi krokami:

1. Obliczenia dla powietrza:

- Obliczyć gęstość powietrza za pomocą wzoru:

$$\delta = 0,289 \frac{p}{T+273} \quad (1)$$

gdzie:

p - ciśnienie atmosferyczne w hPa,

T - temperatura otoczenia w $^{\circ}\text{C}$.

- Obliczyć średnie napięcie przebicia dla powietrza:

$$U_p = \sqrt{2} \cdot u_{psr} \cdot \vartheta \quad (2)$$

gdzie:

u_{psr} - wartość średnia napięcia przebicia z trzech kolejnych pomiarów,

ϑ - przekładnia transformatora probierczego **500**.

- Obliczyć napięcie przeskoku w warunkach normalnych:

$$U_{pn} = \frac{U_p}{\delta} \quad (3)$$

gdzie:

U_{pn} - napięcie przeskoku w warunkach normalnych,

δ - gęstość powietrza.

- Obliczyć natężenie pola elektrycznego:

$$E_p = \frac{U_{pn}}{a} \quad (4)$$

gdzie:

U_{pn} - napięcie przeskoku w warunkach normalnych,

a - odległość pomiędzy elektrodami kulowymi.

Na podstawie uzyskanych obliczeń (tabela 1) należy wykreślić:

- charakterystykę napięcia przebicia w funkcji odległości międzyelektrodowej $U_p = f(a)$,
- oraz natężenie pola elektrycznego w funkcji odległości międzyelektrodowej $E_p = f(a)$.

2. Obliczenia dla płynów elektroizolacyjnych:

- Obliczyć natężenie pola elektrycznego dla olejów elektroizolacyjnych za pomocą wzoru:

$$E_p = \frac{U_p}{a} \quad (5)$$

gdzie:

U_n - napięcie przebicia zmierzone dla odpowiedniego odstępu między elektrodami,

a - odległość między elektrodami.

Wyniki obliczeń zapisać w tabeli 2 i na ich podstawie wykreślić:

- Natężenie pola elektrycznego w funkcji odległości międzyelektrodowej dla oleju mineralnego $E_{pom} = f(a)$,
- Natężenie pola elektrycznego w funkcji odległości międzyelektrodowej dla biodegradowalnego oleju mineralnego $E_{pbom} = f(a)$.

Przedstawić obie charakterystyki $E_{pom} = f(a)$ i $E_{pbom} = f(a)$ na wspólnym wykresie.

3. Analiza i wnioski

Wszystkie opracowane charakterystyki, w tym wykresy, powinny zostać zamieszczone w sprawozdaniu. Na podstawie uzyskanych wyników i sporządzonych charakterystyk należy przeprowadzić porównanie wytrzymałości dielektrycznej powietrza, oleju mineralnego oraz biodegradowalnego oleju mineralnego. W sprawozdaniu należy również sformułować wnioski, które uwzględnią wpływ odległości międzyelektrodowej na wartości napięcia przebicia oraz natężenia pola elektrycznego w przypadku badanych materiałów.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 5

Badanie elementów termoelektrycznych

Lublin 2025 r.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania elementów termoelektrycznych taki jak ogniwa Peltiera oraz analiza ich podstawowych parametrów, takich jak różnica temperatur między stronami modułu, sprawność chłodzenia (COP), charakterystyki prądowo-napięciowe, a także zależności wydajności od napięcia zasilania i warunków pracy.

Zakres ćwiczenia

Analiza ogniwa Peltiera zostanie przeprowadzona poprzez pomiar maksymalnej różnicy temperatur między jego stroną chłodzoną a grzaną w funkcji napięcia zasilającego. Dodatkowo zbadane zostaną temperatury obu stron ogniwa oraz jednocześnie zmierzone parametry elektryczne zasilania. Na podstawie uzyskanych wyników zostaną opracowane charakterystyki przedstawiające maksymalną różnicę temperatur w zależności od napięcia zasilającego.

Następnie obliczona zostanie moc elektryczna pobierana przez ogniwo oraz jego wydajność chłodzenia, co pozwoli na wyznaczenie współczynnika sprawności (COP) modułu Peltiera.

W drugiej części eksperymentu ogniwo będzie badane w odwróconym trybie pracy. Przy użyciu grzałki umożliwiającej ustawienie stałej różnicy temperatur zostaną wykonane pomiary parametrów elektrycznych ogniwa w funkcji obciążenia. Na podstawie tych danych zostaną wykreślone charakterystyki prądowo-napięciowe badanego modułu.

Wykonanie ćwiczenia

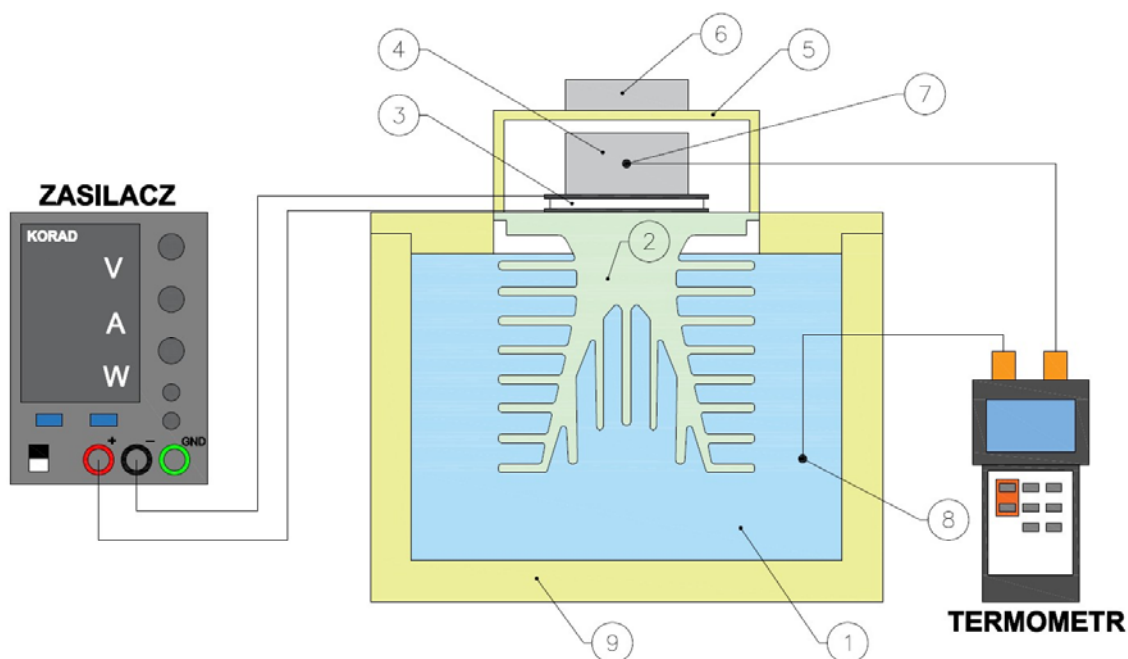
Do wykonania ćwiczenia niezbędne będą następujące elementy:

- Ogniwo Peltiera TEC1-12703 SR
- Radiator
- Dwukanałowy miernik temperatury
- Zasilacz laboratoryjny KORAD U202
- Naczynie pomiarowe termoizolowane
- Rezystor grzewczy

- Bloczek aluminiowy

Pomiar maksymalnej różnicy temperatury

W celu pomiaru maksymalnej różnicy temperatury wykorzystane zostanie stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 1.



Rysunek 1. Stanowisko do badania właściwości modułu Peltiera.

Oznaczenia do rysunku 1:

- 1 – woda,
- 2 – radiator strony gorącej,
- 3 – ogniwo Peltiera,
- 4 – bloczek aluminiowy,
- 5 – izolacja termiczna strony zimnej ogniwa,
- 6 – element obciążający,
- 7 – termopara strony zimnej,
- 8 – termopara strony gorącej,
- 9 – naczynie pomiarowe termoizolowane.

Pomiar maksymalnej różnicy temperatury należy wykonać dla dziewięciu wartości napięcia zasilającego w zakresie 2 V do 15 V. Należy wykonać pomiar temperatury strony gorącej (T_h) oraz zimnej (T_c). Aby wykonać ćwiczenie należy:

1. Do izolowanego cieplnie naczynia pomiarowego wlać 1 litr wody o temperaturze pokojowej, a następnie umieścić w nim radiator z przymocowanym ogniwem Peltiera.
2. Podłączyć ogniwo Peltiera (3) do zasilacza.
3. Na stronie zimnej ogniwa umieścić blok aluminiowy (4).
4. Włożyć termoparę (8) do wody w naczyniu pomiarowym, aby mierzyć temperaturę strony gorącej, oraz przymocować termoparę strony zimnej (7) do bloku aluminiowego (4). Obie termopary podłączyć do miernika temperatury.
5. Ustawić na zasilaczu pracę jako źródło prądowe i ustawić odpowiednią wartość prądu zgodnie z tabelą 1 i uruchomić zasilacz.
6. Odczekać aż temperatury obu stron się ustabilizują, a następnie zapisać wyniki w tabeli 1.
7. Pomiar powtórzyć dla kolejnych wartości napięcia zasilającego.

Tabela 1. Tabela pomiarowa

OGNIWO PELTIERA TEC1-12703 SR							
I	A	0,5	1	1,5	2	2,5	3
T_c	°C						
T_h	°C						
ΔT	°C						

Pomiar mocy chłodniczej oraz współczynnika wydajności

Pomiar mocy cieplnej oraz współczynnika wydajności należy przeprowadzić przy znamionowych parametrach zasilania modułu Peltiera (12 V, 3 A). Układ pomiarowy pozostaje identyczny jak w poprzedniej części ćwiczenia (rys. 1). Aby wykonać tę część ćwiczenia, należy postępować według poniższych kroków:

1. Uruchomić zasilacz laboratoryjny i ustawić na nim wartość natężenia prądu 3 A z ograniczeniem napięciowym 12 V.
2. W chwili uruchomienia zasilania włączyć stoper.
3. Pomiaru natężenia prądu, napięcia oraz temperatur strony zimnej i gorącej ogniwa należy dokonywać co minutę.
4. Otrzymane wyniki należy zanotować w tabeli 2

5. Kontynuować pomiary, aż temperatura strony zimnej osiągnie wartość minimalną lub zacznie rosnąć.

Tabela 2. Tabela pomiarowa

Lp.	t	I	U	P	T_h	T_c	ΔT	Q	ε
	[min]	A	V	W	°C	°C	°C	W	-
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									

Oznaczenia w tabeli:

t – czas trwania pomiaru

I – natężenie prądu ogniwa

U – napięcie ogniwa

P – moc ogniwa

T_h – temperatura strony gorącej

T_c – temperatura strony zimnej

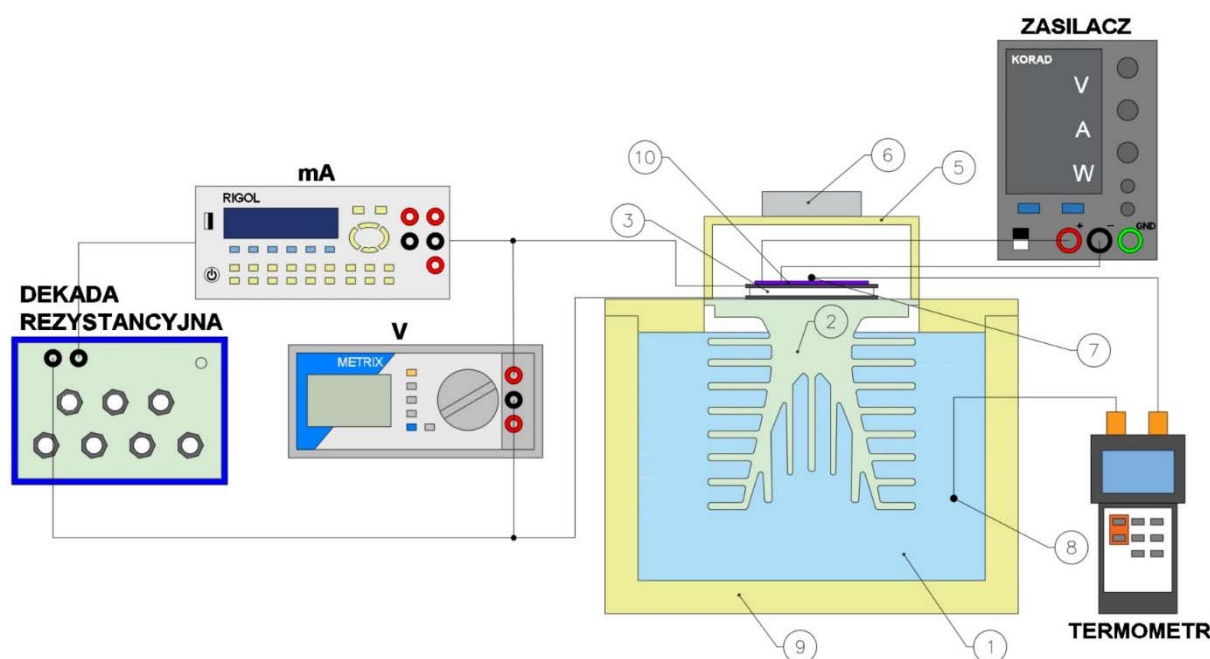
ΔT – różnica temperatur strony zimnej i gorącej

Q – wydajność chłodnicza ogniwa

ε – współczynnik wydajności energetycznej ogniwa

Pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych ogniwa Peltiera

W kolejnej części ćwiczenia zostaną zmierzone charakterystyki prądowo-napięciowe ogniwa Peltiera. W tym celu należy dokonać pomiarów prądu i napięcia ogniwa przy stałej różnicy temperatur między stroną gorącą a zimną, stosując różne wartości obciążenia. Do wykonania pomiarów należy wykorzystać układ przedstawiony na rysunku 2.



Rysunek 2. Stanowisko do badania charakterystyk prądowo napięciowych ogniw Peltiera.

Oznaczenia do rysunku 2:

- 1 – woda,
- 2 – radiator strony gorącej,
- 3 – ogniwo Peltiera,
- 5 – izolacja termiczna strony zimnej ogniwa,
- 6 – element obciążający,
- 7 – termopara strony gorącej,
- 8 – termopara strony zimnej,

- 9 – naczynie pomiarowe termoizolowane,
10 – rezystor grzewczy.

Kolejność działań:

1. Opróżnić naczynie pomiarowe i ponownie napełnić je 1 litrem wody o temperaturze pokojowej.
2. Włożyć ogniwo Peltiera (3) do naczynia pomiarowego, mocując do jednej jego strony rezystor grzewczy (10), a do drugiej radiator (2).
3. Podłączyć do ogniwa szeregowo amperomierz i rezystor dekadowy, a równolegle woltomierz.
4. Podłączyć grzałkę (10) do zasilacza laboratoryjnego.
5. Na zasilaczu ustawić określoną wartość natężenia prądu i uruchomić jego pracę.
6. Po ustabilizowaniu się różnicy temperatur ΔT rozpocząć pomiary napięcia i prądu, zmieniając rezystancję obciążenia zgodnie z tabelą 3.
7. Uzyskane wyniki zapisać w tabeli 3.
8. Następnie zwiększyć wartość prądu na zasilaczu, aby zwiększyć różnicę temperatur ΔT .
9. Powtórzyć pomiary zgodnie z wcześniejszymi krokami.

Tabela 3. Tabela pomiarowa

Lp.	$\Delta T =$				$\Delta T =$		
	R_d	I_1	U_1	P_1	I_2	U_2	P_2
	Ω	mA	V	mW	mA	V	mW
1.	10						
2.	20						
3.	30						
4.	40						
5.	50						
6.	60						
7.	80						
8.	100						
9.	120						
10.	150						

11.	200						
12.	300						
13.	400						
14.	500						
15.	700						
16.	1 000						
17.	1 500						
18.	2 000						
19.	4 000						
20.	6 000						
21.	8 000						
22.	10 000						

Oznaczenia w tabeli 3:

R_d – rezystancja obciążenia

U_1, U_2 – napięcie ogniwa

I_1, I_2 – natężenie prądu ogniwa

P_1, P_2 – moc ogniwa

Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów należy wykreślić charakterystykę maksymalnej różnicy temperatur w funkcji prądu $\Delta T_{max} = f(I)$. zgodnie ze wzorem

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (1)$$

Następnie należy opracować charakterystykę mocy chłodniczej w funkcji czasu. obliczyć wartość wydajności chłodniczej zgodnie ze wzorem 2.

$$Q = \frac{m \cdot c_w \cdot (\Delta T_1 - \Delta T_2)}{t_1 - t_2} \quad (2)$$

gdzie: m – masa bloczka = 0,5 kg, c_w – ciepło właściwe materiału = 1029 J/(kg·°C), ΔT_1 – różnica temperatur dla pierwszego pomiaru, ΔT_2 – różnica temperatur dla poprzedniego pomiaru, $(t_1 - t_2)$ – czas pomiędzy pomiarami.

W celu obliczenia współczynnika wydajności energetycznej należy skorzystać ze wzoru 3 i opracować charakterystykę $\varepsilon = f(\Delta T)$

$$\varepsilon = \frac{Q}{P_e} \quad (3)$$

gdzie: Q – wydajność chłodnicza, P_e – moc elektryczna

Moc elektryczną obliczamy ze wzoru:

$$P_e = U \cdot I \quad (4)$$

Na podstawie uzyskanych wyników (tabela 3) należy wykreślić charakterystyki prądowo-napięciowe $I = f(U)$ dla dwóch wartości różnicy temperatur strony zimnej i gorącej ogniwa. Charakterystyki przedstawić na wspólnym wykresie w skali liniowej. Następnie należy wyznaczyć charakterystyki mocy w zależności od rezystancji obciążenia R_d korzystając ze wzoru

$$P(R_d) = U \cdot I \quad (5)$$

Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń, na wspólnym wykresie, należy przedstawić zależność mocy od rezystancji obciążenia $P = f(R_d)$ dla każdej wartości ΔT . Wykresy powinny być wykonane w skali logarytmicznej, ze względu na szeroki zakres zadanych rezystancji obciążenia. Na podstawie sporządzonych wykresów należy wyznaczyć wartość optymalnej rezystancji dopasowania obciążenia R_{opt} .

Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele wyników przeprowadzonych pomiarów,
- przykładowe obliczenia,
- wykresy zależności: $\Delta T_{max} = f(I)$, $Q = f(t)$, $\varepsilon = f(\Delta T)$, $I = f(U)$, $P = f(R_d)$, dla wszystkich badanych ogniw Peltiera,
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 6

Badanie elementów ochronnych niskiego napięcia

Lublin 2025 r.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z fizycznymi podstawami działania, konstrukcją, właściwościami oraz zasadą funkcjonowania elementów ochronnych. Ponadto ćwiczenie ma na celu analizę charakterystyk i wyznaczenie kluczowych parametrów opisujących właściwości badanych elementów. W ramach realizacji ćwiczenia zostaną określone podstawowe parametry techniczne charakteryzujące elementy ochronne oraz przeprowadzona ocena ich skuteczności w ograniczaniu przepięć.

Zakres ćwiczenia

W ramach ćwiczenia przeprowadzone zostaną badania elementów ochronnych stosowanych w układach niskiego napięcia. Analizie poddane zostaną rezystory nieliniowe, takie jak warystory oraz termistory PTC (ang. Positive Temperature Coefficient), a także odgromniki gazowe. Badania umożliwią wyznaczenie charakterystyk kluczowych parametrów warystorów i termistorów PTC oraz określenie statycznego napięcia zapłonu odgromnika gazowego.

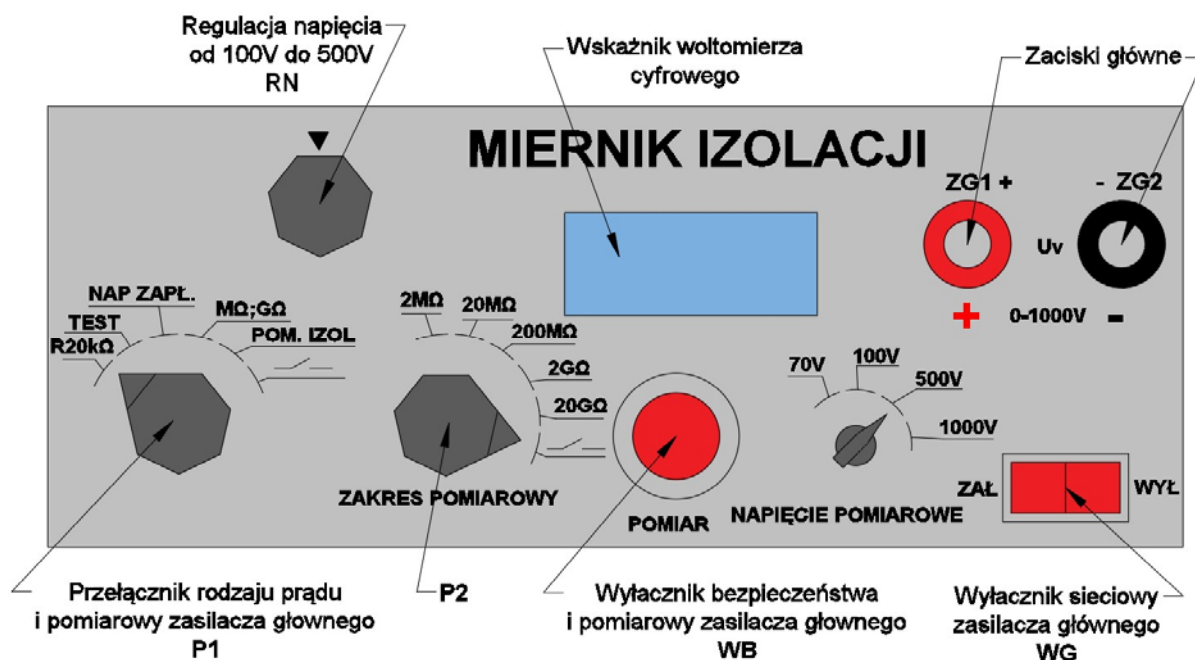
Wykonanie ćwiczenia

Do wykonania ćwiczenia niezbędne będą następujące elementy:

- Miernik izolacji,
- Zasilacz laboratoryjny KORAD KA3005P
- miernik uniwersalny RIGOL DM3058,
- miernik uniwersalny METRIX MX5006,
- Badane elementy ochronne niskiego napięcia.

3. Wyznaczanie statycznego napięcia zapłonu odgromnika

W celu wyznaczenia statycznego napięcia zapłonu odgromnika gazowego wykorzystane zostanie stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 1.



Rysunek 1. Widok płyty czołowej miernika izolacji, używanego w ćwiczeniu jako zasilacz główny o napięciu regulowanym w zakresie (0 ÷ 500) V i (0 ÷ 1000) V.

UWAGA!

Badanie napięcia zapłonu odgromnika gazowego wykonuje się przy użyciu napięcia regulowanego w zakresie od 100V do 500V, z wykorzystaniem miernika izolacji. Ze względu na specyfikę pomiaru, do przeprowadzenia badania niezbędna jest obecność osoby prowadzącej ćwiczenie, po uprzednim poinstruowaniu osób wykonujących ćwiczenie. Aby wykonać tę część ćwiczenia, należy postępować zgodnie z poniższymi krokami:

15. ustawić przełącznik **P1** zasilacza głównego w pozycji „**NAPIĘCIE ZAPŁONU**”,
16. ustawić przełącznik **P2** w pozycji „**WYŁĄCZONY**”,
17. ustawić przełącznik „**NAPIĘCIE POMIAROWE**” w pozycji **500 V**,
18. delikatnie skrócić regulator napięcia ▼ (**RN**) w lewo (potencjometr wieloobrotowy),
19. włożyć badany odgromnik gazowy w osłonie ochronnej do zacisków głównych (**ZG1+** i **ZG2-**),
20. ustawić wyłącznik **WG** w pozycji „**ZAŁ**” i przytrzymać wyłącznik bezpieczeństwa **WB**,

21. obserwując odgromnik przez przezroczystą obudowę, powoli zwiększać napięcie zapłonu regulatorem napięcia (**RN**), aż do wystąpienia zapłonu odgromnika,
22. następnie lekko zmniejszyć napięcie i sprawdzić, czy zapłon nie wystąpi ponownie,
23. minimalnie zwiększając i zmniejszając napięcie, ustalić próg występowania zapłonu, pozostawiając regulator w pozycji progowej,
24. w trakcie ustalania progu dopuszcza się wystąpienie kilku zapłonów,
25. odczytać napięcie ze wskaźnika cyfrowego miernika izolacji, przytrzymując nadal wyłącznik **WB**.

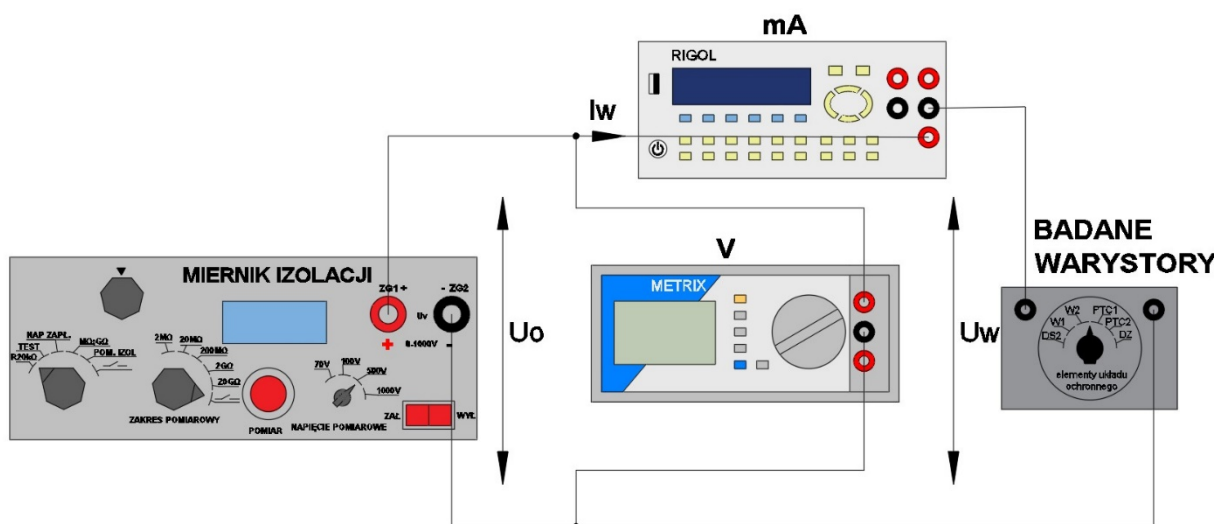
Napięcie progowe, ustalone za pomocą regulatora i odczytane ze wskaźnika cyfrowego miernika izolacji, po zwolnieniu wyłącznika **WB**, stanowi **statyczne napięcie zapłonu odgromnika gazowego**. W sprawozdaniu należy podać zmierzoną wartość napięcia zapłonu dla dwóch różnych odgromników.

Napięcie statyczne zapłonu odgromnika nr 1: $U_C = \dots\dots\dots V$

Napięcie statyczne zapłonu odgromnika nr 2: $U_C = \dots\dots\dots V$

4. Wyznaczanie charakterystyk warystorów

W celu wyznaczenia podstawowych charakterystyk warystorów wykorzystujemy stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 2.



Rysunek 2. Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk prądowo - napięciowych warystorów **W1** i **W2** z poprawnie mierzoną wartością prądu.

UWAGA!

Pomiar podstawowych parametrów w celu wyznaczenia podstawowych charakterystyk warystorów **W1** oraz **W2** przeprowadza się przy napięciu regulowanym w zakresie od 100V do 500V z wykorzystaniem miernika izolacji. Ze względu na wysokie napięcie ćwiczenie rozpoczęcie pomiarów należy rozpocząć po uprzednim poinstruowaniu ćwiczących przez prowadzącego. Aby wykonać tę część ćwiczenia należy:

1. ustawić przełącznik **P1** zasilacza głównego w pozycji **NAPIĘCIE ZAPŁONU**,
2. ustawić przełącznik **P2** w pozycji „**WYŁĄCZONY**”,
3. ustawić przełącznik „**NAPIĘCIE POMIAROWE**” w pozycji **500 V**,
4. do zacisków głównych włączyć (**ZG1+** i **ZG2-**) podłączyć zestawiony układ pomiarowy (rysunek 2),
5. Na płycie czołowej amperomierza należy wcisnąć pomiar prądu stałego  oraz ustawić zakres automatyczny (przycisk **AUTO**),
6. Na płycie czołowej woltomierza ustawić pomiar napięcia stałego przyciskiem **V_{AC+DC}**,
7. Na elemencie oznaczonym na rysunku 2 „**BADANE WARYSTORY**” wybrać warystor **W1**,
8. delikatnie skrócić regulator napięcia ▼ (**RN**) w lewo (potencjometr wieloobrotowy),
9. ustawić wyłącznik **WG** w pozycji „**ZAL**” i przytrzymać wyłącznik bezpieczeństwa **WB**,
10. powoli zwiększać napięcie zasilacza regulatorem napięcia (**RN**), odczytać i zapisać wartość napięcia na woltomierzu **V1** przy wystąpieniu zauważonego prądu **I_w** (amperomierz A1). Wartości prądów **I_w** dla których należy wykonać pomiary przedstawiono w tabeli 1.
11. następnie lekko zwiększyć napięcie zasilacza regulatorem napięcia (**RN**) i odczytać kolejne wartości prądu **I_w**,
12. wyniki pomiarów zanotować w tabeli 1 (warystor **W1**),
13. pomiary powtórzyć (zaczynając od punktu 7) dla Warystora **W2**, a wyniki zanotować w tabeli 2.
14. Po wykonanym ćwiczeniu ustaw wyłącznik **WG** w pozycji „**WYL**”.

Tabela 7. Wyniki pomiarów charakterystyki wariatora W1

L.p.	I_W mA	U_W V	P_W mW	R_{Wstat} kΩ	R_{Wdyn} kΩ	$ R_{Wdyn} $ kΩ	$\beta = \log \frac{U_{11}}{U_6}$	$C = \frac{U_{10}}{I_{10}^\beta}$
1.	0,001							
2.	0,003							
3.	0,01							
4.	0,03							
5.	0,10							
6.	0,20							
7.	0,30							
8.	0,40							
9.	0,50							
10.	0,60							
11.	0,70							
12.	1,00							

Tabela 8. Wyniki pomiarów charakterystyki wariatora W2

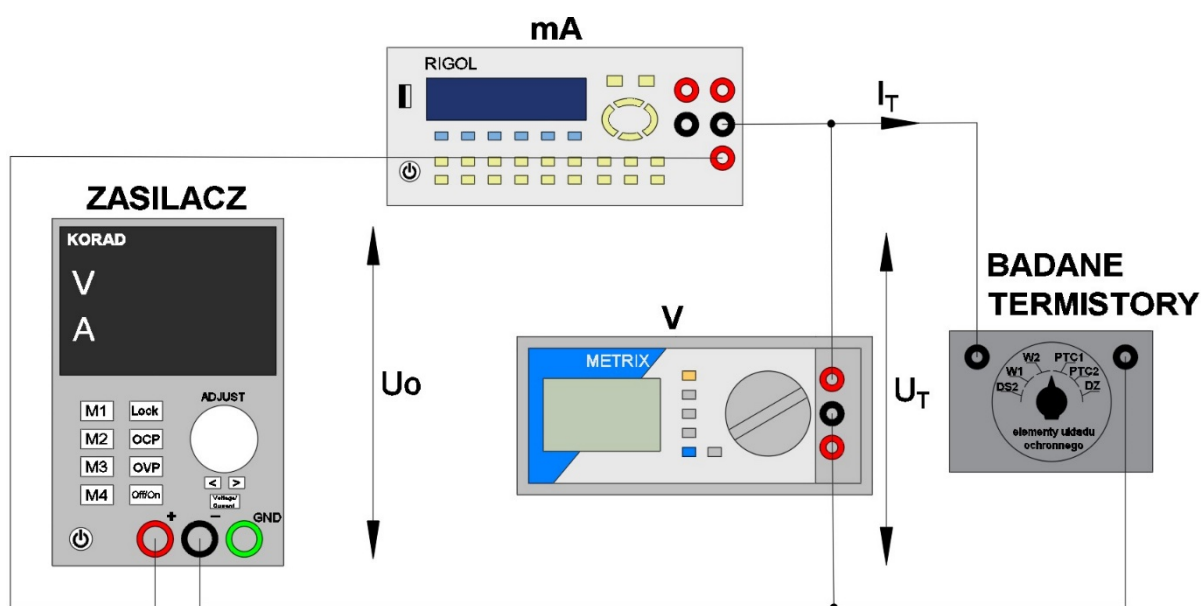
L.p.	I_W mA	U_W V	P_W mW	R_{Wstat} kΩ	R_{Wdyn} kΩ	$ R_{Wdyn} $ kΩ	$\beta = \log \frac{U_{11}}{U_6}$	$C = \frac{U_{10}}{I_{10}^\beta}$
1.	0,001							
2.	0,003							
3.	0,01							
4.	0,03							
5.	0,10							
6.	0,20							
7.	0,30							
8.	0,40							
9.	0,50							
10.	0,60							
11.	0,70							
12.	1,00							

Oznaczenia w tabelach:

- I_W – prąd płynący przez warystor,
- U_W – napięcie na warystorze,
- P_W – moc wydzielona na warystorze,
- R_{Wstat} – rezystancja statyczna warystora,
- R_{Wdyn} – rezystancja dynamiczna warystora,
- β – współczynnik nieliniowości β ,
- C – współczynnik C (spadek napięcia na warystorze, przy przepływie prądu 1A),

5. Wyznaczanie charakterystyk termistorów

W celu wyznaczenia podstawowych charakterystyk termistorów wykorzystujemy stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 3.



Rysunek 3. Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk prądowo - napięciowych termistorów PTC1 i PTC2 z poprawnie mierzoną wartością napięcia.

UWAGA!

Przed rozpoczęciem pomiarów, układ pomiarowy jest sprawdzany przez prowadzącego ćwiczenie, a następnie pomiary wykonują ćwiczący. Podczas badania

elementów ochronnych (takich jak termistory) istotne jest, aby czas wykonywania pojedynczego pomiaru był jak najkrótszy, aby uniknąć niekorzystnego wpływu nagrzewania się elementów na zmiany wskazań mierników. Aby wykonać tę część ćwiczenia, należy:

1. Włączyć zasilacz przyciskiem **ON/OFF**.
2. Na płycie czołowej amperomierza należy wcisnąć pomiar prądu stałego  oraz ustawić zakres automatyczny (przycisk **AUTO**),
3. Na płycie czołowej woltomierza ustawić pomiar napięcia stałego przyciskiem **V_{AC+DC}**,
4. Na elemencie oznaczonym na rysunku 3 „**BADANE TERMISTORY**” wybrać termistor **PTC1**,
5. Na zasilaczu należy ustawić wymagane napięcie, wciskając przycisk **Voltage/Current**, a następnie przyciskami „<” i „>” oraz obracając pokrętkę **ADJUST** ustawić wartość napięcia na zasilaczu tak aby na badanym termistorze (**V1**) uzyskać wartości napięcia w zakresie od 0,5 V do 12 V. Wartości napięć zostały zapisane w tabeli 3.
6. Po ustawieniu odpowiedniego napięcia **U_T** odczytać wartość prądu **I_T** na amperomierzu, a następnie wyniki zapisać w tabeli 3.
7. Powtórzyć pomiar dla wszystkich wartości **U_T**. Otrzymane wyniki zapisać w tabeli 3.
8. Po wykonaniu pomiarów dla termistora **PTC1** powtórzyć pomiar dla termistora **PTC2**, zaczynając od punktu 4. Wyniki zapisać w tabeli 3.

Tabela 9. Wyniki pomiarów charakterystyk termistorów PTC1 i PTC2

L.p.	Termistor PTC1					Termistor PTC2				
	U_T	I_T	P_T	R_{Tstat}	R_{Tdyn}	U_T	I_T	P_T	R_{Tstat}	R_{Tdyn}
	V	mA	mW	Ω	Ω	V	mA	mW	Ω	Ω
1.	0,5					0,5				
2.	1,0					1,0				
3.	1,5					1,5				
4.	2,0					2,0				
5.	2,5					2,5				

6.	3,0					3,0				
7.	4,0					4,0				
8.	5,0					5,0				
9.	6,0					6,0				
10.	8,0					8,0				
11.	10,0					10,0				
12.	12,0					12,0				

Oznaczenia w tabeli:

- I_T – prąd płynący przez warystor,
- U_T – napięcie na warystorze,
- P_T – moc wydzielona na warystorze,
- R_{Tstat} – rezystancja statyczna warystora,
- R_{Tdyn} – rezystancja dynamiczna warystora,

Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników należy przeprowadzić obliczenia korzystając ze wzorów (wyniki zapisać w odpowiednich tabelach):

$$P_W = U_W \cdot I_W, \quad (1)$$

$$R_{stat} = \frac{U_W}{I_W}, \quad (2)$$

oraz przykładowo dla U_4 :

$$R_{dyn(U_4)} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \Big|_{U_4} = \frac{U_5 - U_3}{I_5 - I_3} \Big|_{U_4} \quad (3)$$

Dla warystorów należy również wyznaczyć wartość współczynnika nieliniowości β oraz współczynnik C (spadek napięcia na warystorze, przy przepływie prądu 1A) dla charakterystyk $U = f(I)$, według wzorów:

$$\beta = \log \frac{U_{11}}{U_6} \quad (4)$$

$$C = \frac{U_{10}}{I_{10}^{\beta}} \quad (5)$$

Obliczenia należy zapisać w tabeli 1 oraz tabeli 2. Na podstawie wykonanych obliczeń wykreślić, w skali liniowej, charakterystyki prądowo-napięciowe $I_W=f(U_W)$ warystorów W1 i W2, moc wydzielaną na warystorze w funkcji napięcia $P_W=f(U_W)$, oraz rezystancję statyczną i dynamiczną w funkcji napięcia $R_{stat}=f(U_W)$ i $R_{dyn}=f(U_W)$. Wartości rezystancji statycznej R_{stat} oraz dynamicznej R_{dyn} należy przedstawić w skali logarytmicznej, na wspólnym wykresie.

Dla termistorów wyznaczyć, w skali liniowej, charakterystyki prądowo-napięciowe $I_T=f(U_T)$, moc wydzielaną na termistorze w funkcji napięcia $P_T=f(U_T)$, oraz rezystancję statyczną w funkcji napięcia $R_T=f(U_T)$. Sporządzone charakterystyki należy umieścić w sprawozdaniu.

Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele z wynikami pomiarów i obliczeń,
- przykładowe obliczenia,
- charakterystyki wyszczególnione w rozdziale „Opracowanie wyników”.
- uwagi i wnioski dotyczące otrzymanych wyników.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 7

Badanie właściwości optycznych półprzewodnikowych źródeł światła

Lublin 2025 r.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości optycznych i elektrycznych półprzewodników, wyznaczenie szerokości pasma wzbronionego w badanych półprzewodnikach oraz przeprowadzenie badań zjawiska elektroluminescencji w złączach p - n. Ponadto zdobycie praktycznych umiejętności w obsłudze spektrofotometru i dedykowanego oprogramowania.

Zakres ćwiczenia

Pierwszym etapem ćwiczenia jest przeprowadzenie pomiarów widmowych dwóch wybranych materiałów półprzewodnikowych: arsenku galu (GaAs) oraz tellurku kadmu (CdTe). Po dokonaniu odczytu widma falowego dla obu próbek, uzyskane dane należy wyeksportować do plików w odpowiednim formacie. Eksportowane dane zostaną następnie wykorzystane do sporządzenia wykresów przedstawiających zależność współczynnika transmisji światła od długości fali. Na podstawie tych wykresów możliwe będzie obliczenie energii pasma wzbronionego badanych półprzewodników, co stanowi istotny parametr opisujący ich właściwości fizyczne i optyczne.

W drugiej części ćwiczenia zostaną przeprowadzone analogiczne pomiary dla diod elektroluminescencyjnych (LED) emitujących światło o różnych barwach. Proces ten obejmuje odczytanie widma falowego każdej diody oraz analizę danych w celu wyznaczenia energii emitowanego światła. Wnioski z analizy pozwolą na lepsze zrozumienie zależności pomiędzy długością fali emitowanego światła a energią fotonów.

Stanowisko pomiarowe

W niniejszym ćwiczeniu laboratoryjnym zastosowano specjalistyczne stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko to zostało starannie zaprojektowane w celu precyzyjnego pomiaru widma światła w kontrolowanych warunkach. Kluczowym elementem stanowiska jest szczelna komora pomiarowa, której wnętrzu zostało pomalowane na kolor czarny (rysunek 2). Zabieg ten ma na celu minimalizację efektów rozpraszania światła oraz wyeliminowanie

niepożądanych odbić, które mogłyby wpłynąć na dokładność pomiarów.

Wewnątrz komory umieszczono źródło światła w postaci halogenowej żarówki o maksymalnej mocy $P_{\max} = 10 \text{ W}$ (1) zasilana napięciem stałym 12 V. Konstrukcja oprawy żarówki umożliwia jej szybką i wygodną wymianę w razie potrzeby. Emitowane przez żarówkę światło jest kierowane do spektrofotometru USB 2000, produkowanego przez firmę Ocean Optics (3). Spektrofotometr ten jest podłączony do światłowodu, który doprowadza padające światło do urządzenia w celu analizy widma. Wyniki pomiarów są przekazywane za pośrednictwem kabla USB (2) do komputera wyposażonego w dedykowane oprogramowanie producenta, które umożliwia wizualizację widma w czasie rzeczywistym.

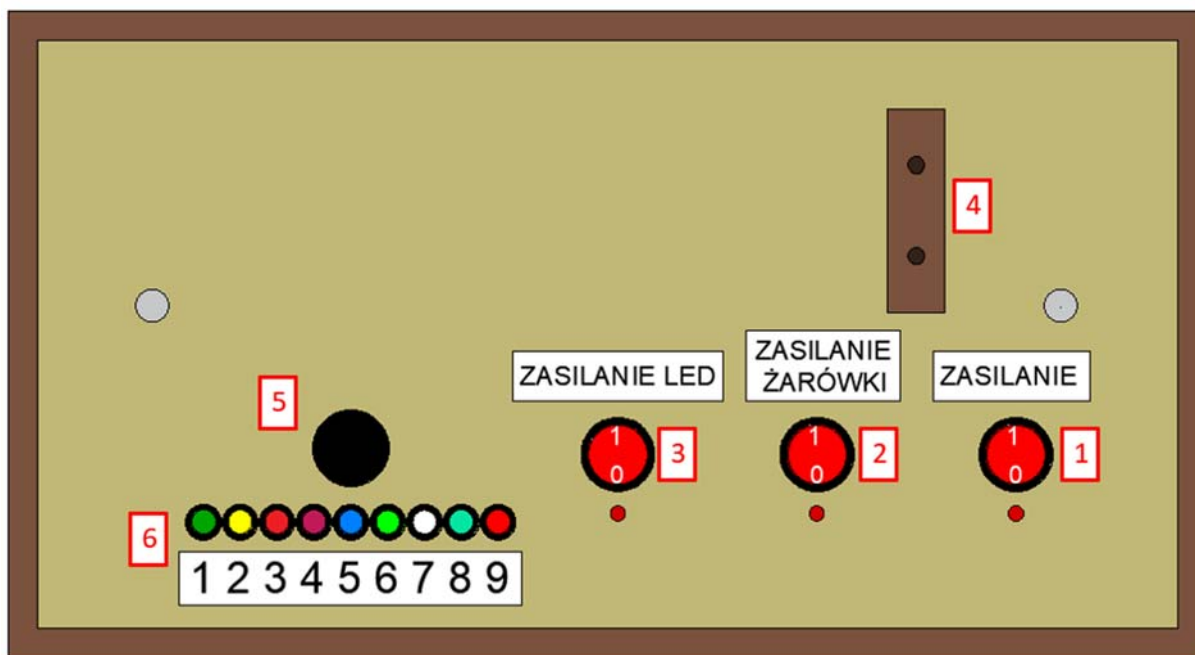
Istotnym elementem stanowiska jest prowadnica trójpołożeniowa (4), umieszczona pomiędzy źródłem światła, a światłowodem (5). Prowadnica umożliwia badanie właściwości optycznych zamontowanych na niej próbek materiałów półprzewodnikowych. Na prowadnicy umieszczono próbki tellurku kadmu (CdTe) o średnicy 7mm i grubości 2mm oraz arsenek galu (GaAs) o średnicy 20mm i grubości 1,5mm. W zależności od ustawienia prowadnicy, światło generowane przez żarówkę halogenową może padać bezpośrednio na sondę spektrofotometru lub przechodzić przez jedną z próbek, co skutkuje modyfikacją widma transmitowanego światła w wyniku właściwości optycznych badanych materiałów.

Dodatkowo, wewnątrz komory pomiarowej zainstalowano dziewięć diod elektroluminescencyjnych (LED) o różnych barwach światła (6):

- Zielona (L-53GC),
- Żółta (HB5-434FY-B),
- Czerwona (HB5-435AOR-C),
- Czerwona (HB5-436ARA-C),
- Niebieska (OSUB56A1A-IJ),
- Żółto - zielona (HB5-433CG),
- Biała (LED5W-LC),
- Nadajnik podczerwieni (L-53F3C),
- Nadajnik podczerwieni (L-53SF4C).

Przełącznik obrotowy (5) umieszczony na płycie czołowej stanowiska pozwala na selektywne załączanie poszczególnych diod, podczas gdy zastosowanie przekątnika

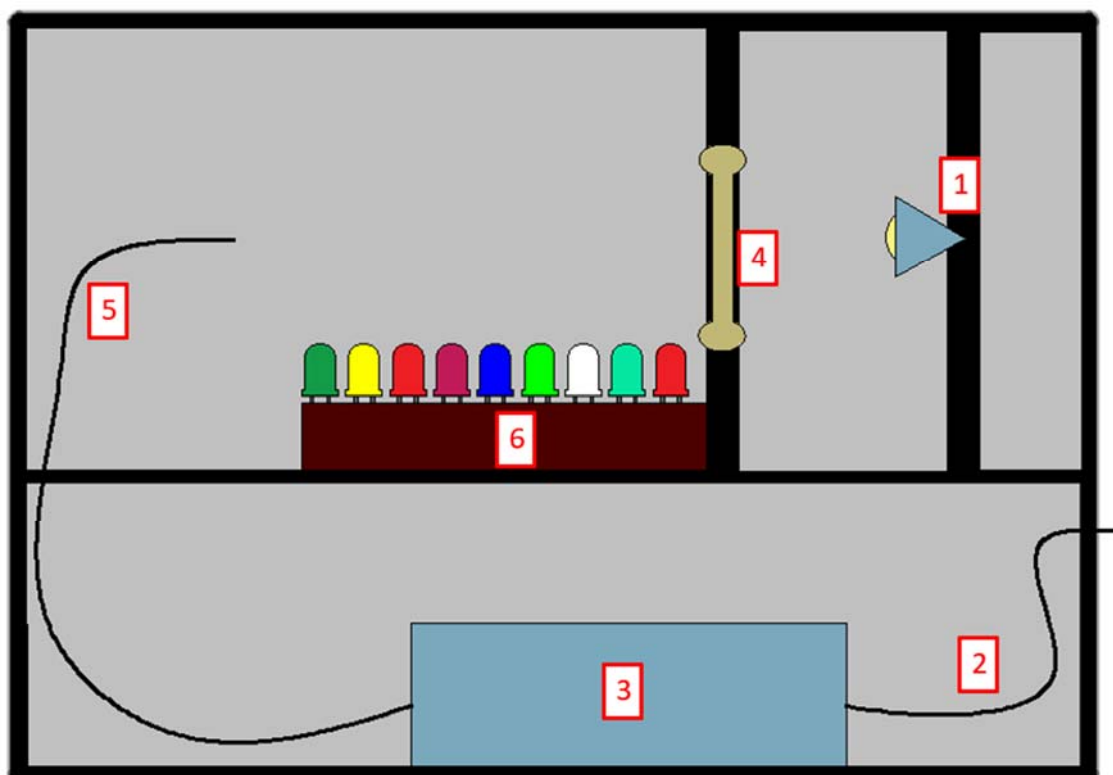
JZC-4123-12VDC umożliwia jednocześnie włączenie wszystkich diod. Widmo światła emitowanego przez diody LED jest rejestrowane za pomocą tego samego spektrofotometru USB 2000 firmy Ocean Optics. Całość układu zasilana jest napięciem stałym o wartości 12 V, dostarczany przez zasilacz. Konstrukcja stanowiska oraz zastosowane komponenty zapewniają wysoki poziom precyzji pomiarowej i pozwalają na kompleksową analizę optycznych właściwości badanych materiałów i źródeł światła.



Rysunek 1. Schemat płyty czołowej stanowiska do precyzyjnego badania transmisji światła w półprzewodnikach

Oznaczenia do rysunku 1:

- 1 – włącznik główny,
- 2 – włącznik żarówki,
- 3 – włącznik diod LED,
- 4 – trójpoleżeniowa prowadnica,
- 5 – pokrętło obrotowe do załączania diod,
- 6 – sygnalizacja zasilania diod LED.



Rysunek 2. Przekrój pionowy stanowiska pomiarowego do badania transmisji światła w półprzewodnikach

Oznaczenia do rysunku 2:

- 1 – żarówka halogenowa,
- 2 – przewód USB transmisji danych,
- 3 – spektrofotometr USB 2000 firmy Ocean Optics,
- 4 – trójpołożeniowa prowadnica,
- 5 – światłowód,
- 6 – listwa zawierająca 9 diod o różnym widmie światła.

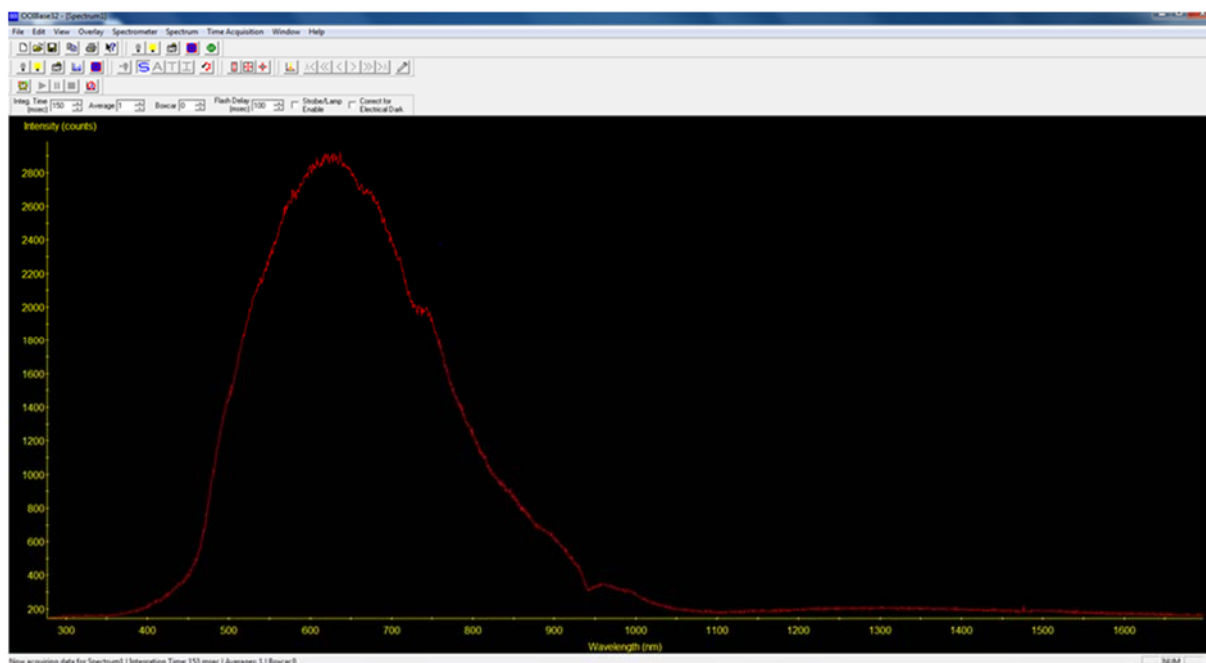
Wykaz urządzeń i aparatury

- Stanowisko do badania transmisji światła w półprzewodnikach
- Spektrofotometr USB 2000 firmy Ocean Optics
- Komputer

Wykonanie ćwiczenia

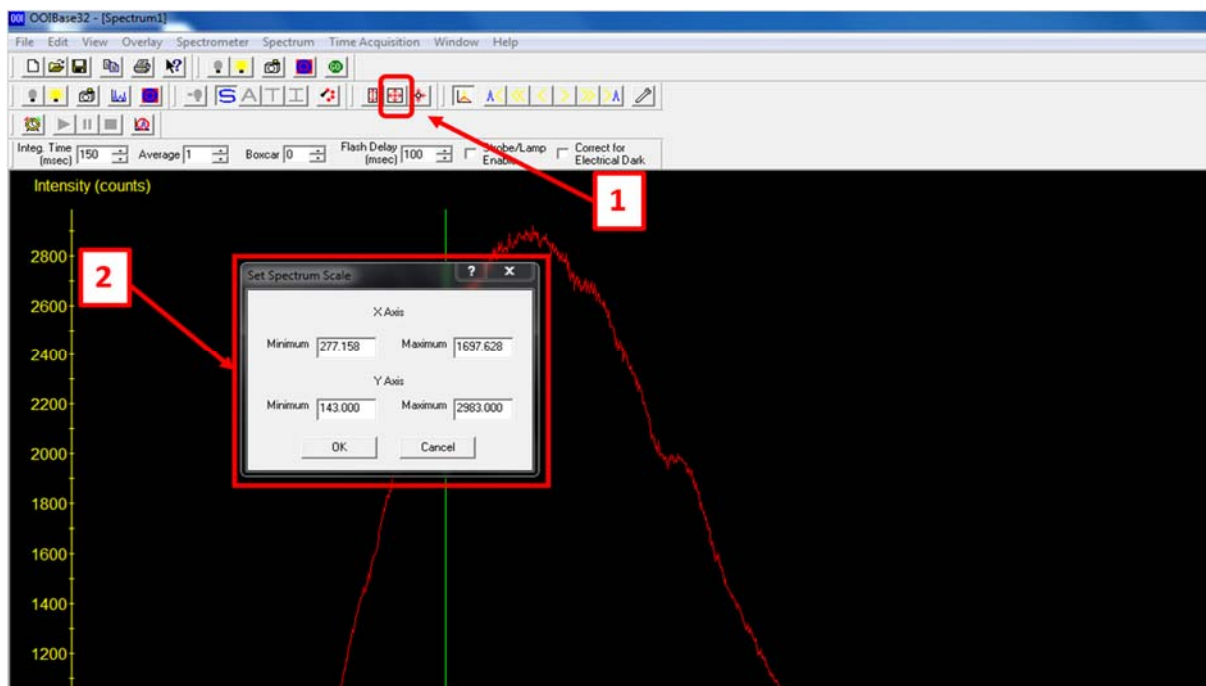
Obsługa oprogramowania OOIBase32

Dedykowane oprogramowanie OOIBase32 firmy Ocean Optics zostało zaprojektowane w celu kompleksowej obsługi spektrofotometru będącego integralną częścią stanowiska laboratoryjnego. Program umożliwia zarówno podgląd w czasie rzeczywistym zarejestrowanego widma promieniowania, jak i zapis wyników pomiarów w dedykowanym formacie pliku. Widmo promieniowania jest automatycznie generowane i wyświetlane bezpośrednio po uruchomieniu aplikacji, co ułatwia natychmiastową analizę danych. Okno programu wraz z widmem zostało przedstawione na rysunku 3.



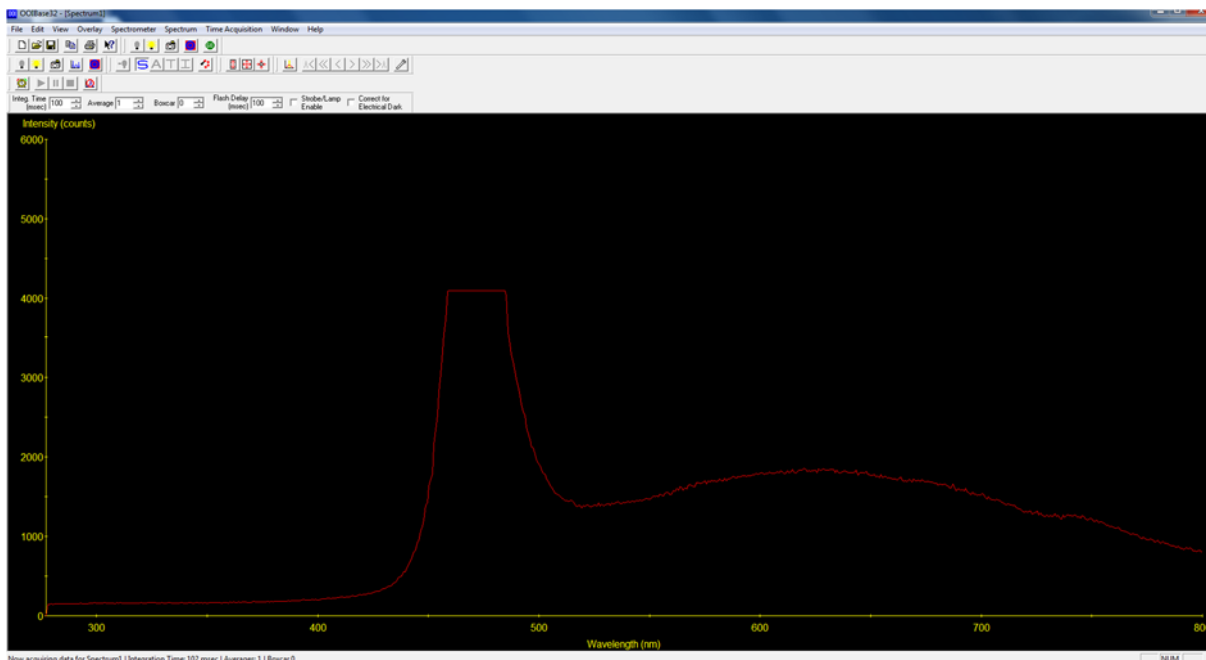
Rysunek 3. Interfejs programu OOIBase32 z wyświetlonym przykładowym widmem światła.

W niektórych sytuacjach program wyświetla wykres widma w sposób ograniczony lub mało czytelny. Jeśli wyświetlany zakres wartości jest nieodpowiedni, wówczas należy dostosować skalę wykresu. Aby to zrobić, należy wybrać ikonę zaznaczoną numerem 1 na rysunku 4. Następnie wyświetla się okno (2) w którym należy ręcznie wybrać interesujący zakres osi X i Y oraz zatwierdzić.



Rysunek. 4. Edycja zakresu wyświetlanego wykresu.

W przypadku gdy po zwiększeniu zakresu osi Y wartości prezentują się tak jak na rysunku 5 tzn. widać ewidentnie, że jest to ograniczone od góry mimo zmiany skali, oznacza to, że intensywność promieniowania wykracza poza zakres pomiarowy spektrofotometru.

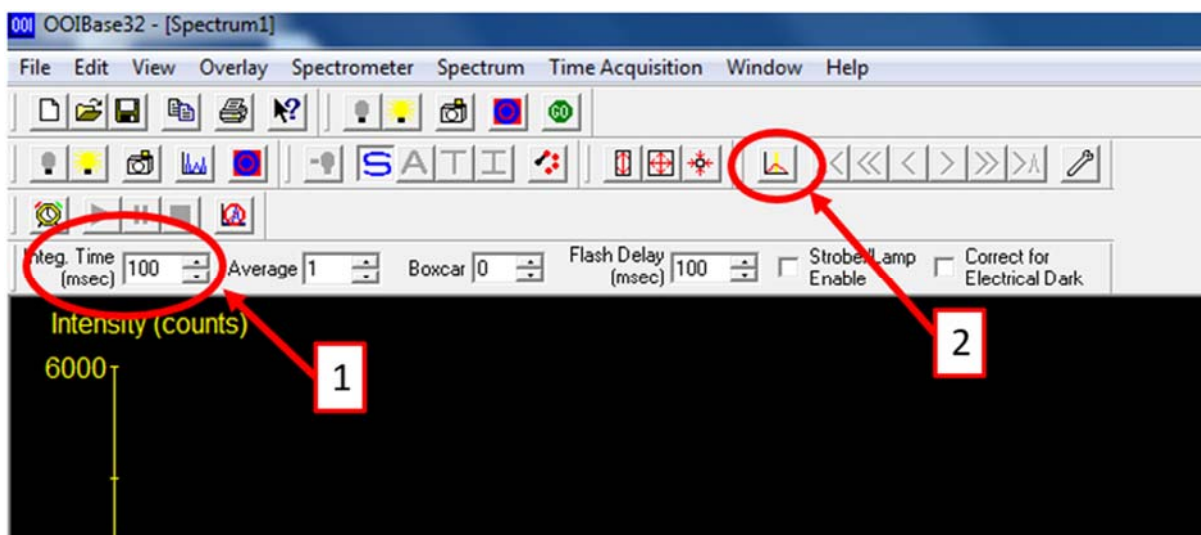


Rysunek 5. Interfejs programu OOIBase32 z wyświetlonym przykładowym widmem wskazującym przesycenie detektora.

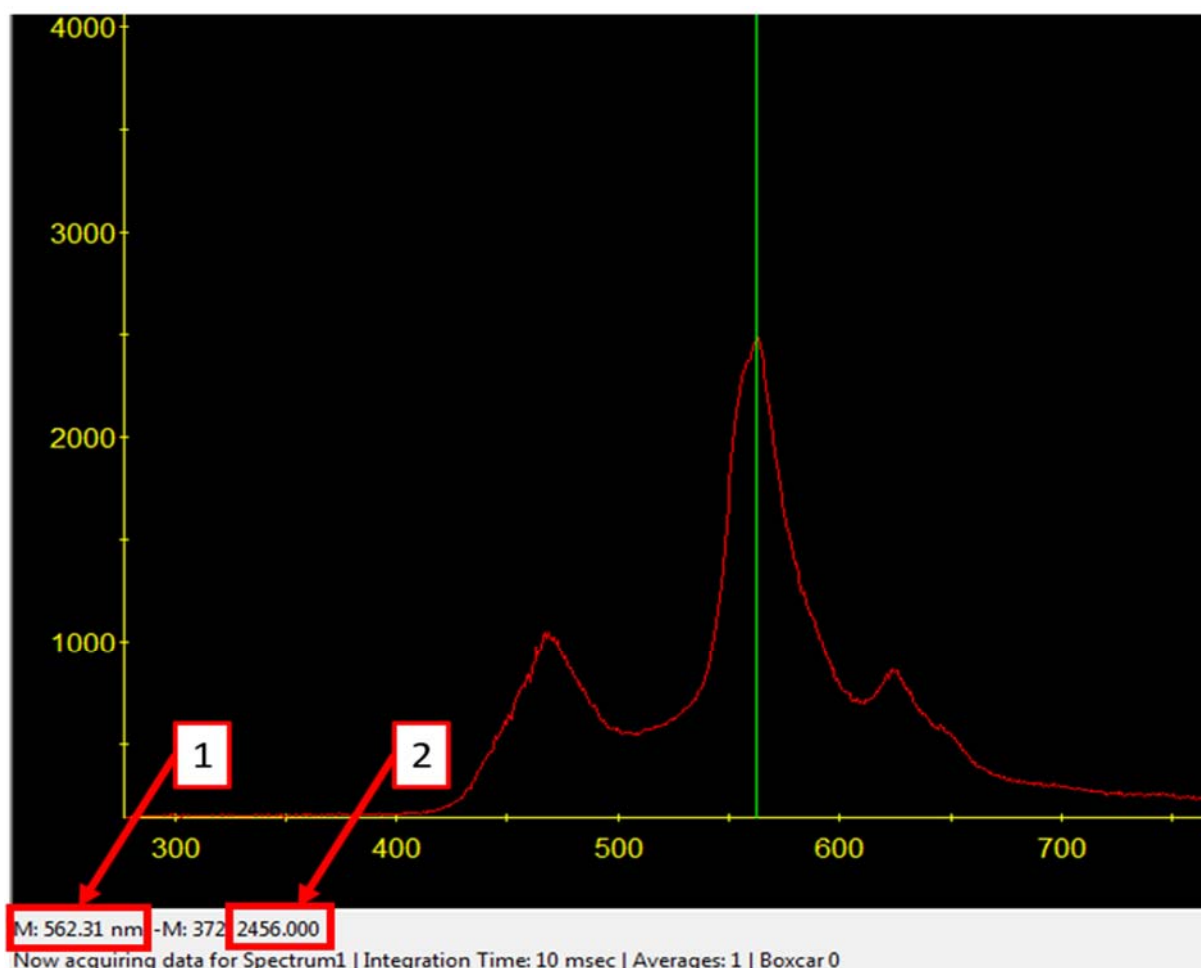
W takim przypadku należy zmienić czas próbkowania. Czas próbkowania spektrofotometru to okres, w którym urządzenie wykonuje pomiar natężenia światła. Jest to istotny parametr wpływający na dokładność i precyzję uzyskanych wyników. Jeśli natężenie światła wykracza poza zakres pomiarowy spektrofotometru (detektor jest "przesycony"), należy skrócić czas próbkowania. Skrócenie czasu zapobiegnie nasyceniu detektora i pozwoli na poprawne zarejestrowanie sygnału, który inaczej byłby poza skalą. Aby zwiększyć dokładność pomiarów należy czas próbkowania dobierać dłuższy co pozwala detektorowi zebrać więcej informacji o natężeniu światła. Uśrednia to szумы i fluktuacje sygnału, co prowadzi do bardziej precyzyjnych i stabilnych wyników, lecz należy pamiętać, że jeśli natężenie światła jest zbyt wysokie, długi czas próbkowania może przesycić detektor. Standardowa wartość czasu próbkowania wynosi 100 ms którą należy zmieniać tylko w przypadku pomiarów wykraczających poza skalę spektrofotometru. Aby zmienić czas próbkowania należy zmienić wartość *Integration Time* oznaczoną numerem 1 na rysunku 6.

Program ponadto umożliwia export odczytanych ze spektrofotometru danych w postaci widma do pliku. Aby to zrobić należy w zakładkach w lewym górnym rogu wybrać file/save/sample. Należy pamiętać, aby wybrać rozszerzenie *.sample. To rozszerzenie umożliwi odczyt zapisanych danych w arkuszu kalkulacyjnym takim jak np. Microsoft Excel.

Na rysunku 6 punktem numer 2 oznaczono włączanie oraz wyłączanie wskaźnika przesuwanego. Po włączeniu tej funkcji, na ekranie pojawia się pionowa zielona linia. Jest ona przydatna, ponieważ umożliwia odczytanie wartości natężenia światła dla wybranej długości fali. Aby odczytać te dane, wystarczy wybrać kursorem miejsce wstawienia wskaźnika, a informacje wyświetlają się w lewym dolnym rogu. Na rysunku 7 punktem numer 1 oznaczono wartość długości fali zaś numerem 2 wartość intensywności światła.



Rysunek 6. Interfejs programu OOIBase32: 1 - zmiana czasu próbkowania, 2 - wskaźnik przesuwany, pozwalający na dokładny odczyt długości fali oraz jej współczynnika intensywności.



Rysunek 7. 1 – długość fali wskaźnika przesuwanego, 2 – wartość intensywności światła

Badanie właściwości optycznych półprzewodnikowych źródeł światła

W celu wyznaczenia szerokości przerwy energetycznej na podstawie widma falowego półprzewodników arsenek galu (GaAs), tellurek kadmu (CdTe) należy:

- Włączyć komputer, do którego przewodem podłączony jest spektrofotometr USB 2000, produkowanego przez firmę Ocean Optics,
- Przełącznik „ZASILANIE” (1) ustawić w pozycji 1, co skutkuje włączeniem spektrofotometru,
- Przełącznik „ZASILANIE ŻARÓWKI” (2) ustawić w pozycji 1,
- Upewnić się, że przełącznik „ZASILANIE LED” (3) jest ustawiony w pozycji 0,
- Wsunąć prowadnicę trójpółżeniową (4) maksymalnie do środka, widmo światła żarówki pokaże się automatycznie na ekranie monitora,
- Jeżeli istnieje taka konieczność należy dostosować skalę wykresu widma,
- Jeżeli wykres wychodzi poza zakres spektrofotometru, należy go dopasować za pomocą modyfikacji wartości próbkowania,
- Odczytane dane należy wyeksportować w postaci pliku na dysk. Aby to zrobić należy przejść do zakładki i wybrać file/save/sample. Należy pamiętać, aby plik zapisać z rozszerzeniem *.sample. Zapisany plik będzie zawierał widmo żarówki halogenowej co należy uwzględnić w nazwie pliku,
- Wysunąć prowadnicę (4) do momentu zatrzaśnięcia w pozycji środkowej. W tej pozycji światło żarówki halogenowej przechodzi przez próbkę arsenku galu. Należy przeanalizować wyświetlane na ekranie widmo światła zmieniając skalę wykresu widma, a następnie wyeksportować w sposób analogiczny do punktu poprzedniego,
- Wysunąć prowadnicę (4) maksymalnie i powtórzyć czynność dla próbki z tellurku kadmu analogicznie do poprzedniego punktu.
- Wyeksportowane pliki zależności intensywności światła od długości fali należy zapisać na nośniku pamięci, ponieważ będą niezbędne do obliczeń szerokości przerwy energetycznej.
- Po zakończeniu pomiarów należy wsunąć prowadnicę trójpółżeniową (4)

maksymalnie do środka oraz przełącznik „ZASILANIE ŻARÓWKI” (2) ustawić w pozycji 0,

W celu wyznaczenia energii emitowanej przez diody LED na podstawie widma falowego należy:

- Przełącznik „ZASILANIE” (1) ustawić w pozycji 1, co skutkuje włączeniem spektrofotometru,
- Przełącznik „ZASILANIE LED” (3) ustawić w pozycji 1,
- Upewnić się, że przełącznik „ZASILANIE ŻARÓWKI” (2) jest ustawiony w pozycji 0,
- Kolejne diody można włączać za pomocą pokrętła obrotowego (5), a ich aktywność wewnątrz obudowy jest wskazywana przez zapalenie odpowiednich diod na obudowie (6). Dwie ostatnie diody po prawej stronie, zielona i migająca czerwona, sygnalizują działanie nadajników podczerwieni. Widmo promieniowania każdej z diod wyświetlane jest automatycznie na ekranie monitora,
- Jeżeli istnieje taka konieczność należy dostosować skalę wykresu widma,
- Jeżeli wykres wychodzi poza zakres spektrofotometru należy go dopasować za pomocą modyfikacji wartości próbkowania,
- Odczytane dane każdej z diod należy wyeksportować w postaci pliku na dysk. Aby to zrobić należy przejść do zakładki i wybrać file/save/sample. Należy pamiętać, aby plik zapisać z rozszerzeniem *.sample. Rodzaj diody należy uwzględnić w nazwie pliku,
- Po zakończeniu pomiaru należy przełącznik „ZASILANIE LED” (3) oraz „ZASILANIE” (1), ustawić w pozycji 0,
- Wyeksportowane pliki zależności intensywności światła w zależności od długości fali dla każdej z diod należy zapisać na nośniku pamięci, ponieważ będą niezbędne do obliczeń energii emitowanej przez diody LED.

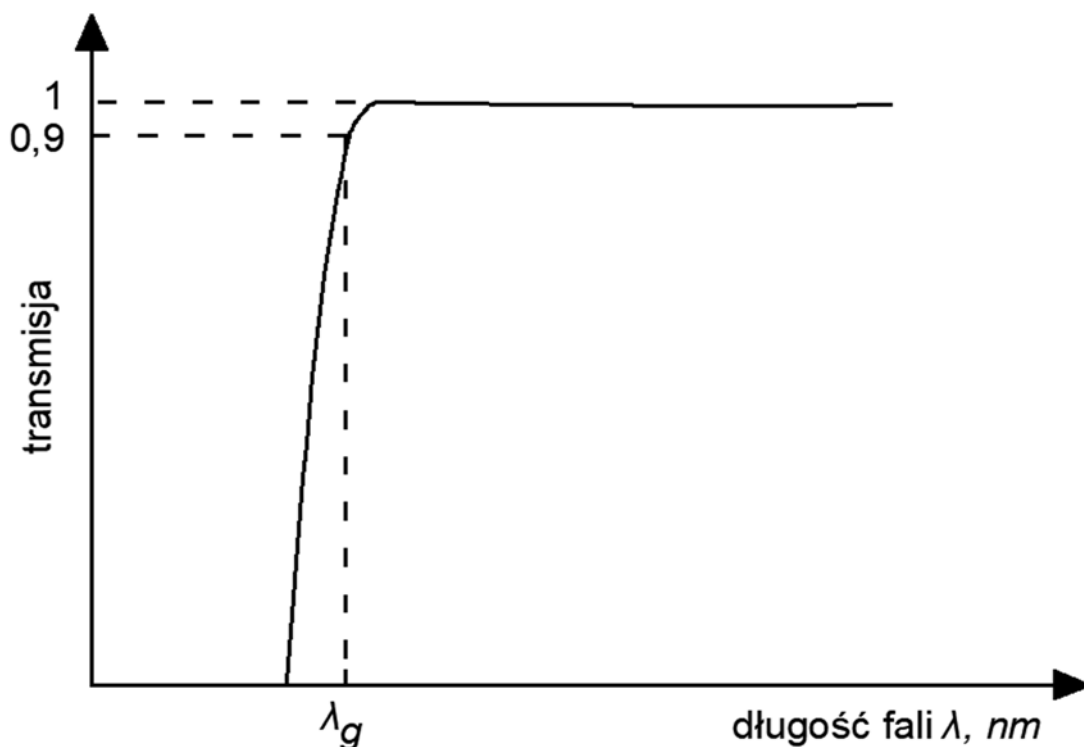
Opracowanie wyników

Wyznaczenie szerokości przerwy energetycznej na podstawie widma falowego

W celu wyznaczenia szerokości przerwy energetycznej na podstawie widma falowego półprzewodników, arsenku galu (GaAs) oraz tellurku kadmu (CdTe), należy przeanalizować zapisane wyniki uzyskane w pierwszej części ćwiczenia. Analiza powinna obejmować zależność współczynnika transmisji światła od długości fali. Kluczowym etapem jest zidentyfikowanie maksymalnej wartości współczynnika transmisji w badanym zakresie widma. Na podstawie tej wartości należy następnie wyznaczyć wartość równą 90% tej maksymalnej wartości ($0,9 T_{max}$), a następnie odczytać graniczną długość fali λ_g . Wyznaczoną w ten sposób wartość λ_g należy podstawić do wzoru określającego szerokość pasma wzbronionego:

$$\Delta E_G = \frac{c \cdot h}{\lambda_g}$$

gdzie: ΔE_G - energia pasma wzbronionego badanej próbki, c - prędkość światła, $c = 299\,792\,458$ m/s, h - stała Plancka, $h = 4,14 \cdot 10^{-15}$ eV·s, λ_g – wyznaczona graniczna długość fali odpowiadająca wartości 0,9 maksymalnego współczynnika transmisji (wartość ta została przedstawiona na rysunku 9). Zmierzone wartości granicznej długości fali oraz szerokość przerwy energetycznej należy zamieścić w tabeli 1.



Rys. 9. Krzywa teoretyczna widma transmisji

Tabela 1. Wyniki obliczeń granicznej długości fali oraz energii pasma wzbronionego

Badana próbka	λ_g	ΔE_G
	nm	eV
Źródło światła (żarówka halogenowa)		
Arsenek Galu		
Tellurek kadmu		

Po wyznaczeniu granicznej długości fali λ_g i obliczenia szerokości pasma wzbronionego, za pomocą wyeksportowanych danych należy wykonać trzy wykresy zawierające widmo źródła światła w przypadku żarówki halogenowej oraz widma transmisji światła dla próbek GaAs i CdTe w funkcji długości fali.

Wyznaczenie energii emitowanej przez diody LED na podstawie widma falowego

Aby wyznaczyć energię emitowaną przez diody LED na podstawie widma falowego należy wykorzystać zapisane wyniki w celu sporządzenia wykresów zależności współczynnika transmisji światła w funkcji długości fali. Na podstawie opracowanych

75



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

wykresów należy określić wartość energii emitowanej przez diody LED. W tym celu należy zidentyfikować maksymalny współczynnik transmisji, a następnie odczytać odpowiadającą mu długość fali λ . Uzyskaną wartość długości fali należy wprowadzić do wzoru opisującego energię emitowaną przez diodę:

$$E = \frac{c \cdot h}{\lambda}$$

gdzie: E - energia emitowana przez diodę, c - prędkość światła, $c = 299\,792\,458$ m/s, h - stała Plancka, $h = 4,14 \cdot 10^{-15}$ eV·s, λ - długość fali odpowiadająca maksymalnej wartości współczynnika transmisji, λ [nm] = $\lambda \cdot 10^{-9}$ [m].

Wyniki obliczeń dla każdej z diod należy zanotować w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki obliczeń granicznej długości fali oraz energii pasma wzbronionego

Badana dioda	λ , nm	E , eV
1. L-53GC (zielona)		
2. HB5-434FY-B (żółta)		
3. HB5-435AOR-C (czerwona)		
4. HB5-436ARA-C (czerwona)		
5. OSUB56A1A-IJ (niebieska)		
6. HB5-433CG (żółto-zielona)		
7. L-53F3C (nadajnik podczerwieni)		
8. L-53SF4C (nadajnik podczerwieni)		
9. LED5W-LC (biała) - szerokość widma		

Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- stronę tytułową,
- wykresy zależności współczynnika transmisji w funkcji długości fali, opracowane na podstawie zarejestrowanych danych,
- wykres zawierający widmo źródła światła oraz widma transmisji światła w funkcji długości fali dla próbek GaAs i CdTe,
- obliczenia szerokości pasma wzbronionego badanych próbek oraz energii emitowanej przez diody,

- wykresy zawierające widma diod LED,
- uwagi i wnioski z przeprowadzonych pomiarów.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 8

Badanie właściwości ogniw fotowoltaicznych

Lublin 2025 r.

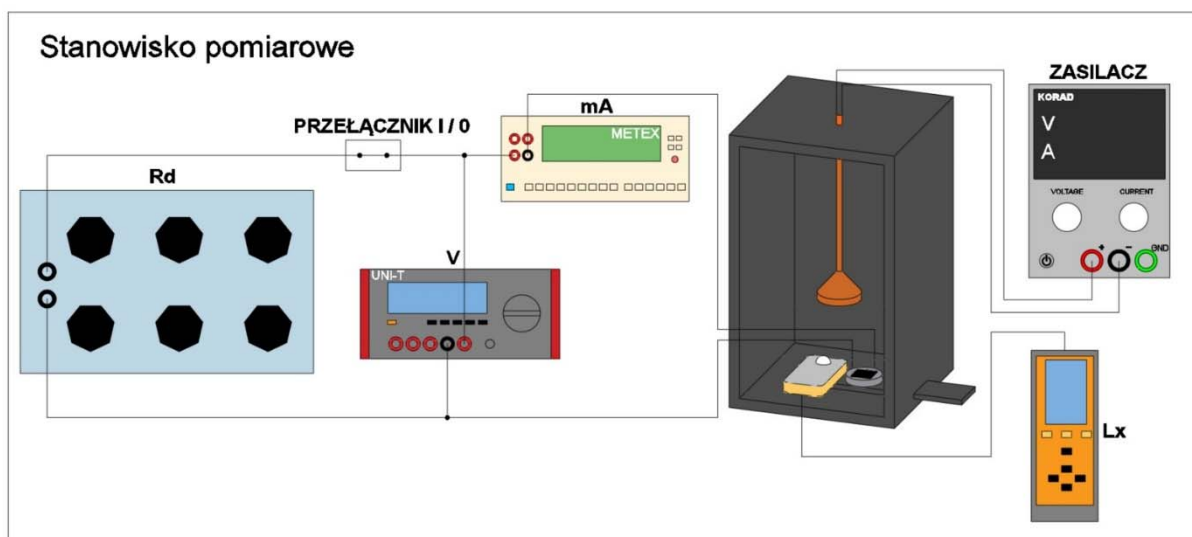
Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową, zasadami działania oraz właściwościami elementów słonecznych opartych na półprzewodnikowym złączu p-n, a także z niektórymi metodami ich badania.

Zakres ćwiczenia

W ramach ćwiczenia przeprowadzone zostaną badania elementów słonecznych opartych na półprzewodnikowym złączu p-n. Ćwiczenie składa się z dwóch części. W pierwszej części dokonuje się pomiarów natężenia oświetlenia E_ϕ , prądu zwarcia I_{ZF} oraz napięcia jałowego fotoogniwa U_{0F} dla różnych wartości napięcia zasilającego U_Z , w celu sporządzenie charakterystyk prądu zwarcia i napięcia jałowego w funkcji natężenia oświetlenia. W drugiej części wykonuje się pomiary prądu oraz napięcia fotoogniwa przy obciążeniu go różnymi wartościami rezystancji. Pomiary zostaną przeprowadzone dla czterech różnych napięć zasilających. Na podstawie uzyskanych wyników opracowane zostaną charakterystyki prądowo-napięciowe fotoogniwa, a także wyznaczona zostanie wartość mocy w zależności od rezystancji obciążenia R_d . Ostatnim etapem ćwiczenia będzie analiza uzyskanych wyników pomiarów i sformułowanie wyników.

Stanowisko pomiarowe



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru prądu zwarcia i napięcia jałowego fotoogniwa.

W układzie pomiarowym zostały wykorzystane następujące elementy:

- Zasilacz KORAD KD3005D
- miliwoltomierz cyfrowy Unit-T UT803,
- miliamperomierz cyfrowy Metex MXD-4660A,
- luksomierz cyfrowy AXIO AX-L230,
- Jako obciążenie w obwodzie pomiarowym wykorzystany został rezystor dekadowy o zakresie rezystancji ($0 \div 1$) M Ω .

Wykonanie ćwiczenia

6. Pomiar prądu zwarcia i napięcia jałowego fotoogniwa

Pomiary należy przeprowadzić dla 11 różnych wartości natężenia oświetlenia E_ϕ zmieniając napięcie zasilające źródła światła U_z w zakresie od 2V do 12V z krokiem 1V, zgodnie z konfiguracją stanowiska pomiarowego przedstawionego na rysunku 1. Dla każdej zmierzonej wartości natężenia oświetlenia, należy również zmierzyć prąd zwarcia I_{ZF} oraz napięcie jałowe ogniwa U_{0F} . Aby wykonać ćwiczenie, należy wykonać następujące kroki:

26. Ustawić wartość rezystancji na rezystorze dekadowym R_d na wartość „0” ($R_d=0$), co oznacza, że badane fotoogniwo nie jest obciążone.
27. Włączyć luksomierz przyciskiem **ON**.
28. Włączyć zasilacz w celu zasilenia żarówki halogenowej przyciskiem **POWER**.
29. Na zasilaczu wciskając, a następnie obracając pokrętkę (**VOLTAGE**) ustawić wymagane napięcia zasilające w zakresie od 2V do 12V.
30. Wysunąć tackę, na której znajdują się czujnik luksomierza oraz badane ogniwo. Wysłunięcie tacki powoduje, że źródło światła skierowane jest prostopadle do czujnika luksomierza (żarówka halogenowa znajduje się nad czujnikiem).
31. Odczytać wartość natężenia światła i zapisać wyniki w tabeli 1. Zwrócić uwagę na wyświetlaną wartość na luksomierzu. W przypadku gdy na wyświetlaczu wyświetla się komunikat „OL” wcisnąć przycisk **RANGE**, aby ustawić odpowiedni zakres pomiarowy.
32. Wsunąć tackę, na której znajduje się czujnik luksomierza oraz badane ogniwo.

Wsunięcie tacki powoduje, że źródło światła skierowane jest prostopadle do badanego ogniwa (żarówka halogenowa znajduje się nad fotoogniwem).

33. Ustawić **przełącznik 1** w pozycji „1” (stan zwarcia). Odczytać wartość prądu zwarcia I_{ZF} na amperomierzu i zapisać wynik w tabeli 1.

34. Ustawić **przełącznik 1** w pozycji „0” (stan jałowy). Odczytać wartość napięcia jałowego U_{OF} na woltomierzu i zapisać wynik w tabeli 1.

35. Powtórzyć pomiar dla wszystkich ustawionych wartości napięcia zasilającego, wykonując czynności od punktu 4 i zapisując w tabeli 1.

Tabela 10. Wyniki pomiarów prądu zwarcia i napięcia jałowego fotoogniwa

L.p.	U_z	E_Φ	I_{ZF}	U_{OF}
	V	lx	mA	V
1.	2,0			
2.	3,0			
3.	4,0			
4.	5,0			
5.	6,0			
6.	7,0			
7.	8,0			
8.	9,0			
9.	10,0			
10.	11,0			
11.	12,0			

Oznaczenia w tabeli:

U_z - napięcie zasilające źródło światła,

E_Φ - natężenie strumienia świetlnego,

I_{ZF} - prąd zwarcia fotoogniwa,

U_{OF} - napięcie jałowe fotoogniwa.

7. Pomiar charakterystyk prądowo-napięciowych fotoogniwa

Pomiary należy przeprowadzić zgodnie z układem przedstawionym na rysunku 1. Dla czterech wartości natężenia strumienia świetlnego E_Φ , należy wykonać pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych. Pomiary wykonuje się dla wartości rezystancji obciążenia R_d , w zakresie od 10Ω do $1M\Omega$, podanych w tabeli 2. Aby wykonać

ćwiczenie należy:

1. Na zasilaczu ustawić zadaną wartość napięcia. Wartości napięć umieszczono w tabeli 2. Wartości natężenia strumienia świetlnego dla zadanej wartości napięcia należy odczytać z tabeli 1 i uzupełnić w tabeli 2.
2. Wsunąć tackę, na której znajduje się czujnik luksomierza oraz badane ogniwo. Wsuniecie tacki powoduje, że źródło światła skierowane jest prostopadle do badanego ogniwa (żarówka halogenowa znajduje się nad fotoogniwem).
3. Ustawić **przełącznik 1** w pozycji „1”.
4. Na rezystorze dekadowym R_d ustawić wymaganą wartość rezystancji, zgodnie z tabelą 2.
5. Odczytać wartość prądu I_1 na amperomierzu oraz wartość napięcia U_1 na woltomierzu, a następnie zapisać wynik w tabeli 2.
6. Powtórzyć pomiar dla wszystkich wartości rezystancji R_d i napięć zasilających U_z . Otrzymane wyniki zapisać w tabeli 2.

Tabela 11. Wyniki pomiarów charakterystyk prądowo - napięciowych fotoogniwa

L.p.	$U_{z1} = 8 \text{ V}$ $E_{\phi 1} = \dots\dots\dots$			$U_{z2} = 9 \text{ V}$ $E_{\phi 2} = \dots\dots\dots$			$U_{z3} = 11 \text{ V}$ $E_{\phi 3} = \dots\dots\dots$			$U_{z4} = 12 \text{ V}$ $E_{\phi 4} = \dots\dots\dots$		
	R_d	I_1	U_1	R_d	I_1	U_1	R_d	I_1	U_1	R_d	I_1	U_1
	Ω	mA	V	Ω	mA	V	Ω	mA	V	Ω	mA	V
1.	10			10			10			10		
2.	20			20			20			20		
3.	30			30			30			30		
4.	40			40			40			40		
5.	50			50			50			50		
6.	60			60			60			60		
7.	80			80			80			80		
8.	100			100			100			100		
9.	120			120			120			120		
10.	150			150			150			150		
11.	200			200			200			200		
12.	300			300			300			300		
13.	400			400			400			400		

14.	500			500			500			500		
15.	700			700			700			700		
16.	1 000			1 000			1 000			1 000		
17.	1 500			1 500			1 500			1 500		
18.	2 000			2 000			2 000			2 000		
19.	4 000			4 000			4 000			4 000		
20.	6 000			6 000			6 000			6 000		
21.	8 000			8 000			8 000			8 000		
22.	10 000			10 000			10 000			10 000		

Oznaczenia w tabeli:

R_d - rezystancja obciążenia w obwodzie pomiarowym,

I_1 - prąd płynący przez rezystancję obciążenia,

U_1 - spadek napięcia na rezystancji obciążenia.

Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników (tabela 1) należy wykreślić charakterystyki prądu zwarcia w funkcji natężenia oświetlenia $I_{ZF} = f(E_\Phi)$ oraz napięcia jałowego w funkcji natężenia oświetlenia $U_{OF} = f(E_\Phi)$. Z wyników uzyskanych z tabeli 2 wyznaczyć charakterystykę prądowo-napięciową fotoogniwa $I = f(U)$. Charakterystyki prądowo-napięciowe dla różnych napięć zasilających powinny być przedstawione na wspólnym wykresie, przy czym należy wybrać skalę liniową. Aby wyznaczyć charakterystyki mocy w zależności od rezystancji obciążenia R_d należy skorzystać ze wzoru:

$$P(R_d) = U \cdot I \quad (1)$$

Wyniki obliczeń mocy zestawień w tabeli 3. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń, na wspólnym wykresie, należy przedstawić zależność mocy od rezystancji obciążenia $P = f(R_d)$ dla każdej wartości natężenia światła. Wykresy powinny być wykonane w skali logarytmicznej, ze względu na szeroki zakres zadanych rezystancji obciążenia. Na podstawie sporządzonych wykresów należy wyznaczyć wartość optymalnej rezystancji dopasowania obciążenia R_{opt} . Na podstawie uzyskanych

wyników i charakterystyk opracować wnioski z wykonanego ćwiczenia.

Tabela 12. Wyniki obliczeń

L.p.	R_d	$E_{\Phi 1} = \dots\dots\dots$	$E_{\Phi 2} = \dots\dots\dots$	$E_{\Phi 3} = \dots\dots\dots$	$E_{\Phi 4} = \dots\dots\dots$
	Ω	P_1	P_2	P_3	P_4
		mW	mW	mW	mW
1	10				
2	20				
3	30				
4	40				
5	50				
6	60				
7	80				
8	100				
9	120				
10	150				
11	200				
12	300				
13	400				
14	500				
15	700				
16	1 000				
17	1 500				
18	2 000				
19	4 000				
20	6 000				
21	8 000				
22	10 000				

Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele wyników przeprowadzonych pomiarów,

- przykładowe obliczenia,
- wykresy zależności: $I_{sc} = f(E_{\Phi})$, $U_{OC} = f(E_{\Phi})$, $I = f(U)$, $P = f(R_d)$,
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 9

Wyznaczanie charakterystyk prądowo-napięciowych złącz p-n wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych

Lublin 2025 r.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie i analiza podstawowych własności elektrycznych złączy p - n, wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych.

Zakres ćwiczenia

Analiza zostanie przeprowadzona poprzez pomiar napięcia oraz prądu płynącego przez złącza p-n w diodach półprzewodnikowych wykonanych z krzemu, germanu, arsenku galu oraz w diodzie Zenera. Pomiary będą realizowane w obu kierunkach polaryzacji – przewodzenia i zaporowym – co umożliwi wyznaczenie charakterystyk prądowo-napięciowych dla każdej z badanych diod. Na podstawie uzyskanych wyników i przeprowadzeniu analizy sporządzonych charakterystyk zostaną odczytane wartości napięć progowych, przy których poszczególne diody zaczynają przewodzić. Otrzymane wartości zostaną porównane z szerokościami pasma zabronionego dla materiałów, z których wykonano diody. Ostatecznym etapem analizy będzie opracowanie wniosków na podstawie przeprowadzonych pomiarów i zebranych danych.

Stanowisko pomiarowe

W niniejszym ćwiczeniu wykorzystano stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko to pozwala na wyznaczenie zależności prądowo-napięciowej $I = f(U)$ zarówno w kierunku przewodzenia, jak i w kierunku zaporowym, dla czterech rodzajów diod półprzewodnikowych: krzemowej, germanowej, z arsenku galu oraz diody Zenera.

Oznaczenia do rysunku 1:

- 1 – miejsce przyłączenia zasilacza prądu stałego,
- 2 – miejsce przyłączenia woltomierza V1, mierzącego napięcie przy włączeniu diody w kierunku zaporowym,
- 3 – miejsce przyłączenia miliamperomierza, mierzącego prąd przepływający przez diodę,
- 4 – przełącznik kierunku pracy diody (przewodzenia / zaporowy),
- 5 – przełącznik wyboru diody,
- 6 – miejsce przyłączenia woltomierza V2, mierzącego napięcie przy włączeniu diody w kierunku przewodzenia.
- 7 – wyłącznik główny stanowiska

Wykonanie ćwiczenia

8. Pomiar właściwości diod w kierunku przewodzenia

W celu wyznaczenia charakterystyk prądowo-napięciowych diod półprzewodnikowych wykonanych z różnych materiałów, należy postępować zgodnie z poniższymi krokami:

- podłączyć stanowisko laboratoryjne do gniazda zasilającego i włączyć zasilanie przyciskiem (7) na przedniej ścianie stanowiska,
- w miejscu (1), oznaczonym na rysunku 1, podłączyć zasilacz laboratoryjny KORAD KA3005P.
- przełącznikiem (4) ustawić kierunek pracy diody na przewodzenie,
- dla pomiarów w kierunku przewodzenia woltomierz powinien być podpięty bezpośrednio na badanej diodzie ze względu na jej niską rezystancję dla tej polaryzacji, przez co na elementach układu podłączonych szeregowo w stosunku do diody występować będą znaczne spadki napięć. W związku z powyższym woltomierz należy podłączyć do zacisków (C) i (D) na rysunku 1,
- miliamperomierz należy podłączyć zgodnie z schematem przedstawionym na rysunku 1. Na płycie czołowej amperomierza należy wcisnąć pomiar prądu stałego  oraz ustawić zakres automatyczny (przycisk AUTO),
- przełącznikiem (5) dokonać wyboru diody do pomiaru. Wybór danego rodzaju

diody sygnalizowany jest zapaleniem się lampki obok nazwy elementu, którego charakterystykę będziemy wyznaczali,

- na zasilaczu laboratoryjnym ustaw ograniczenie prądowe na 720 mA naciskając przycisk M1, na dolnym wyświetlaczu zasilacza pojawi się wartość 0,720 A oraz dioda kontrolna,
- przyciskiem Off/On uruchomić pracę zasilacza, powinna zaświecić się dioda na wyświetlaczu w pozycji (OUT),
- wciskając przycisk Voltage/Current, a następnie przyciskami „<” i „>” oraz obracając pokrętkę ADJUST ustawić wartość napięcia na zasilaczu, aby wartość napięcia na diodzie (woltomierz V2) odpowiadała wartości podanej w tabeli 1.
- po ustawieniu napięcia odczytać wartość natężenia prądu w złączu p-n z miliamperomierza (mA).
- pomiary wykonać dla 4 diod notując otrzymane wyniki w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów diod półprzewodnikowych w kierunku przewodzenia.

Kierunek przewodzenia							
Krzem		German		Arsenek galu		Dioda Zenera	
U_2	I	U_2	I	U_2	I	U_2	I
V	mA	V	mA	V	mA	V	mA
0,10		0,05		0,10		0,10	
0,20		0,10		0,20		0,20	
0,30		0,15		0,30		0,30	
0,40		0,20		0,40		0,40	
0,50		0,25		0,50		0,50	
0,60		0,30		0,60		0,60	
0,65		0,35		0,70		0,70	
0,70		0,40		0,75		0,80	
0,75		0,45		0,80		0,90	
0,80		0,50		0,85			
0,90		0,55		0,90			
1,00		0,60		0,95			
1,10				1,00			
				1,10			
				1,20			

9. Pomiar właściwości diod w kierunku zaporowym

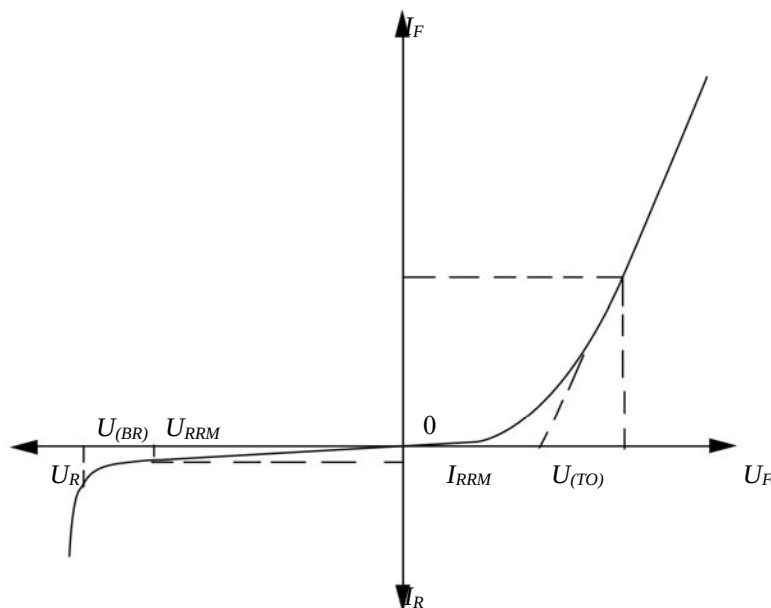
- podłączyć stanowisko laboratoryjne do gniazda zasilającego i włączyć zasilanie przyciskiem (7) na przedniej ścianie stanowiska,
- w miejscu (1), oznaczonym na rysunku 1, podłączyć zasilacz laboratoryjny KORAD KA3005P.
- przełącznikiem (4) ustawić kierunek pracy diody na zaporowy,
- dla pomiarów w kierunku zaporowym woltomierz powinien być podpięty przed miliamperomierzem, aby zapewnić poprawny pomiar prądu, ze względu na bardzo wysoką rezystancję diody w kierunku zaporowym. Rezystancja wewnętrzna woltomierza w układzie rzeczywistym jest niższa niż rezystancja diody przez co prąd płynący przez woltomierz spowodowałoby znaczące zafałszowanie wyników. W związku z powyższym woltomierz należy podłączyć do zacisków (A) i (B) na rysunku 1,
- miliamperomierz należy podłączyć zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1. Na płycie czołowej amperomierza należy wcisnąć pomiar prądu stałego  oraz ustawić zakres automatyczny (przycisk **AUTO**).
- przełącznikiem (5) dokonać wyboru diody do pomiaru. Wybór danego rodzaju diody sygnalizowany jest zapaleniem się lampki obok nazwy elementu, którego charakterystykę będziemy wyznaczać,
- na zasilaczu laboratoryjnym ustaw ograniczenie prądowe na 120 mA naciskając przycisk **M2**, na dolnym wyświetlaczu zasilacza pojawi się wartość 0,120 A oraz dioda kontrolna,
- przyciskiem **Off/On** uruchomić pracę zasilacza, powinna zaświecić się dioda na wyświetlaczu w pozycji (**OUT**),
- wciskając przycisk **Voltage/Current**, a następnie przyciskami „<” i „>” oraz obracając pokrętkę **ADJUST** ustawić wartość napięcia na zasilaczu, aby wartość napięcia na diodzie (**woltomierz V2**) odpowiadała wartości podanej w tabeli 2.
- po ustawieniu napięcia odczytać wartość natężenia prądu w złączu p-n z miliamperomierza (mA).
- pomiary wykonać dla 4 diod notując otrzymane wyniki w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów diod półprzewodnikowych w kierunku zaporowym.

Kierunek zaporowy							
Krzem		German		Arsenek galu		Dioda Zenera (krzem)	
U_2	I	U_2	I	U_2	I	U_2	I
V	μA	V	μA	V	μA	V	mA
0,5		0,5		0,5		0,5	
1,0		1,0		1,0		1,0	
2,0		2,0		2,0		2,0	
3,0		3,0		3,0		3,0	
4,0		4,0		4,0		4,0	
5,0		5,0		5,0		5,0	
5,8		5,8		5,8		5,5	
						5,6	
						5,7	
						5,8	

Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników należy wykreślić charakterystyki prądowo - napięciowe zbadanych diod półprzewodnikowych (osobne dla kierunku przewodzenia i zaporowego dla poszczególnych diod). Z charakterystyk diod należy odczytać napięcia progowe, przy których dana dioda zaczyna przewodzić (punkt przecięcia stycznej do charakterystyki z osią X, jak na rysunku 2) i porównać uzyskane wartości z szerokościami pasma zabronionego dla materiałów z których zostały wykonane. Dodatkowo dla diod wykonanych z krzemu, germanu, arsenku galu oraz diody Zenera przedstawić wspólne charakterystyki prądowo-napięciowe dla kierunku przewodzenia oraz dla kierunku zaporowego. Następnie należy opracować wnioski z wykonanego ćwiczenia.



Rysunek 2. Charakterystyka prądowo - napięciowa diody prostowniczej, gdzie: $U_{(TO)}$ - napięcie progowe, $U_{(BR)}$ - napięcie przebicia, I_F , U_F - prąd i napięcie przewodzenia, I_R , U_R - prąd i napięcie wsteczne, U_{RRM} - powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne

Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele wyników przeprowadzonych pomiarów,
- charakterystyki prądowo napięciowe $I=f(U)$
- wartości napięcia progowego
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników.

Pytania kontrolne/wstęp teoretyczny

Wstęp teoretyczny do zagadnienia objętego niniejszym ćwiczeniem znajdują się w materiałach dydaktycznych do wykładu z przedmiotu Materiałoznawstwo Elektrotechniczne Przemek podaj slajdy

- Charakterystyki i parametry diod prostowniczych.
- Właściwości diody Zenera.
- Właściwości złącza p - n.

- Półprzewodnik samoistny i domieszkowany, rodzaje domieszkowania.
- Model pasmowy półprzewodnika.
- Rozpatrz złącze p - n spolaryzowane w kierunku przewodzenia i zaporowym. Omawiając zachodzące zjawiska fizyczne wykaż, że ma ono właściwości prostownicze.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 10

Wyznaczanie temperaturowych zależności prądu wstecznego diod wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych

Lublin 2025 r.

Cel ćwiczenia

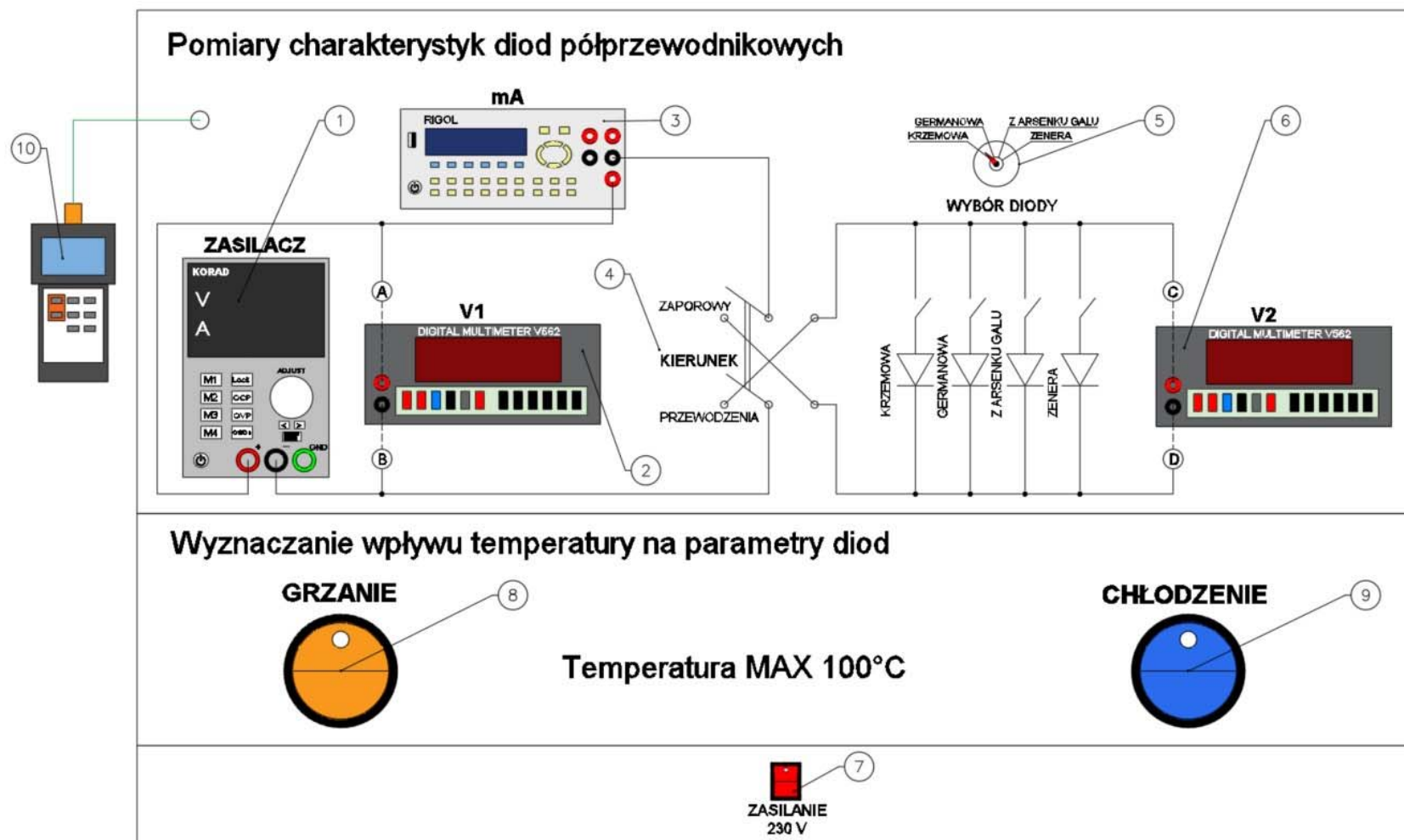
Celem ćwiczenia jest zbadanie i analiza temperaturowych właściwości złączy p - n, wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych.

Zakres ćwiczenia

Parametry temperaturowe półprzewodnikowych złączy p-n wykonanych z różnych materiałów zostaną przeanalizowane poprzez pomiar prądu wstecznego diod półprzewodnikowych krzemowej oraz germanowej przy stałym napięciu dla zmiennej temperatury. Pozwoli to na wykreślenie charakterystyk logarytmicznych prądu wstecznego w funkcji odwrotności temperatury. I na jej podstawie określona zostanie wartość szerokości przerwy energetycznej złącza.

Stanowisko pomiarowe

W niniejszym ćwiczeniu wykorzystano stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. Stanowisko to pozwala na wyznaczenie zależności prądu wstecznego diody w funkcji temperatury $I = f(T_p)$ dla czterech rodzajów diod półprzewodnikowych: krzemowej, germanowej, z arsenku galu oraz diody Zenera. Badane próbki umieszczone są w probówce wypełnionej olejem. Do probówki doprowadzona jest termopara sprzężona z cyfrowym miernikiem temperatury pozwalająca na pomiar temperatury wewnątrz układu. Układ pomiarowy jest podgrzewany przez wbudowaną grzałkę ponadto w celu przyspieszenia procesu chłodzenia próbek stanowisko jest w układ chłodzenia składający się z wentylatorów.



Rysunek 1. Widok płyty czołowej stanowiska laboratoryjnego do pomiaru charakterystyk diod półprzewodnikowych z uwzględnieniem przełączników, wykorzystywanych podczas pomiarów

Oznaczenia do rysunku 1:

- 1 – miejsce przyłączenia zasilacza prądu stałego,
- 2 – miejsce przyłączenia woltomierza V1, mierzącego napięcie przy włączeniu diody w kierunku zaporowym,
- 3 – miejsce przyłączenia miliamperomierza, mierzącego prąd przepływający przez diodę,
- 4 – przełącznik kierunku pracy diody (przewodzenia / zaporowy),
- 5 – przełącznik wyboru diody,
- 6 – miejsce przyłączenia woltomierza V2, mierzącego napięcie przy włączeniu diody w kierunku przewodzenia,
- 7 – wyłącznik główny stanowiska,
- 8 – wyłącznik układu grzania diod,
- 9 – wyłącznik układu chłodzenia diod,
- 10 – miernik temperatury.

Wykaz urządzeń i aparatury

- Stanowisko do badań diod półprzewodnikowych,
- Zasilacz KORAD KA3005P,
- Mutimetr RIGOL DM3058,
- Woltomierz MERATRONIK V562,
- Termometr cyfrowy LUTRON TM-906A

Wykonanie ćwiczenia

Badanie wpływu temperatury na właściwości diod półprzewodnikowych

W celu wykonania badania prądu wstecznego w funkcji temperatury należy:

- podłączyć stanowisko laboratoryjne do gniazda zasilającego i włączyć zasilanie przyciskiem (7) na przedniej ścianie stanowiska,
- w miejscu (1), oznaczonym na rysunku 1, podłączyć zasilacz laboratoryjny KORAD KA3005P,
- przełącznikiem (4) ustawić kierunek pracy diody na zaporowy,

- miliamperomierz należy podłączyć zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1. Na płycie czołowej amperomierza należy wcisnąć pomiar prądu stałego (I z kreską) oraz ustawić zakres automatyczny (przycisk AUTO),
- przełącznikiem (5) dokonać wyboru diody do pomiaru. Wybór danego rodzaju diody sygnalizowany jest zapaleniem się lampki obok nazwy elementu, którego charakterystykę będziemy wyznaczali,
- podłączyć czujnik temperatury do termopary wyprowadzonej ze stanowiska, a następnie go włączyć i ustawić rozdzielczość wyświetlanej temperatury do części dziesiętnych stopni Celsjusza,
- na zasilaczu laboratoryjnym ustawić ograniczenie prądowe na 1 A, naciskając przycisk **M3**, na dolnym wyświetlaczu zasilacza pojawi się wartość 1 A oraz zapali się dioda kontrolna,
- ustawić napięcie 3V na zasilaczu laboratoryjnym, a następnie przyciskiem Off/On uruchomić pracę zasilacza, powinna zaświecić się dioda na wyświetlaczu w pozycji (OUT),
- włącznikiem (8) uruchomić grzałkę i uważnie obserwować wskazania miernika temperatury,
- w momencie gdy temperatura układu osiągnie wartość **85°C wyłączyć grzałkę**, bezwładność cieplna układu spowoduje osiągnięcie temperatury próbek nieznacznie powyżej 100°C i zacznie spadać,
- gdy temperatura opadając osiągnie wartość 100°C rozpocząć pomiar odczytując wartość prądu wstecznego diod z amperomierza,
- wykonać pomiary w zakresie temperatur od 100°C do 25°C zgodnie z tabelą 1. Punkty pomiarowe ułożone są naprzemiennie co 2,5°C co umożliwia jednoczesny pomiar zarówno diody krzemowej jak i germanowej, w trakcie pomiarów przełączać przełącznikiem (5) pomiędzy diodą krzemową i germanową,
- gdy temperatura spadnie poniżej 80°C należy włączyć chłodzenie przyciskiem (9),
- wyniki zanotować w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów diod półprzewodnikowych z krzemu i germany w kierunku zaporowym dla różnych temperatur.

U ₂	Krzem				German			
3V	t _p	T _{pk}	I	I _a	t _p	T _{pk}	I	I _a
	°C	K	μA	A	°C	K	μA	A
	100				97,5			
	95				92,5			
	90				87,5			
	85				82,5			
	80				77,5			
	75				72,5			
	70				67,5			
	65				62,5			
	60				57,5			
	55				52,5			
	50				47,5			
	45				42,5			
	40				37,5			
	35				32,5			
	30				27,5			
	25				25,5			

Opracowanie wyników

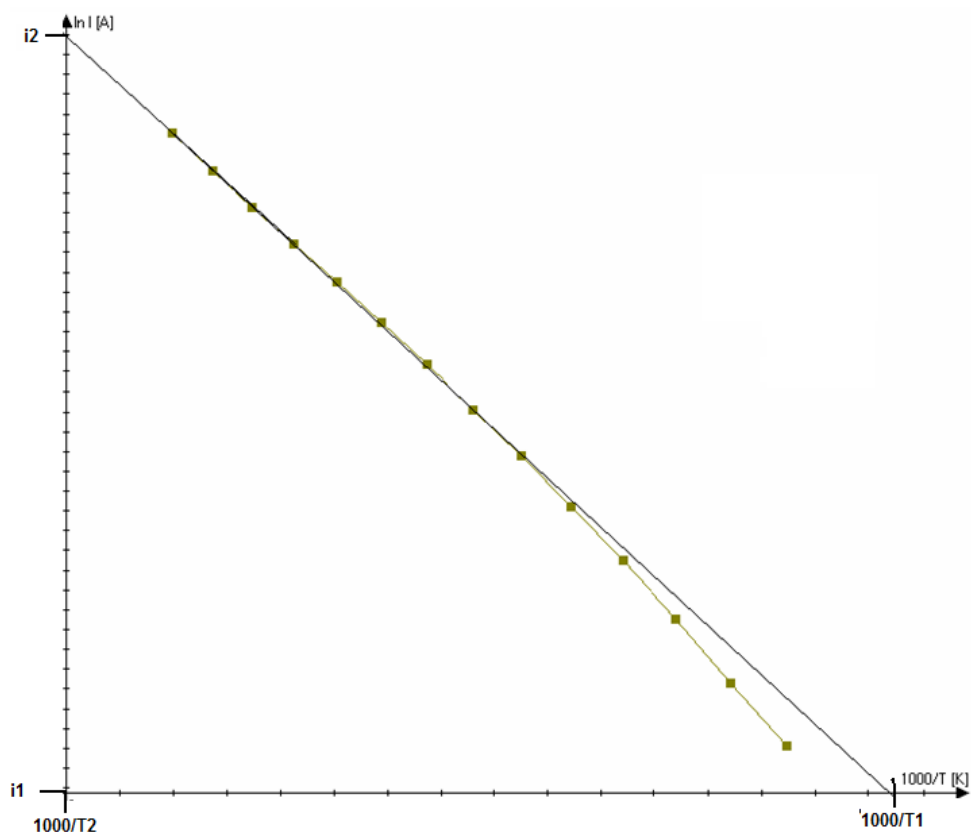
Na podstawie uzyskanych wyników należy wykreślić charakterystyki prądu wstecznego zbadanych diod półprzewodnikowych w postaci $\ln(I_a) = f(1000/T_{pk})$. W celu określenia poprawnej wartości przerwy energetycznej temperatury pomiarowe należy przeliczyć na temperaturę w kelwinach (K) zgodnie ze wzorem (1) i umieścić w tabeli 1.

$$T_{pk} = (t_p + 273), K \quad (1)$$

Z wykresu należy wybrać odcinek prostoliniowy o największej stromości i wykreślić przedłużenie tego odcinka. Następnie odczytać wartości i_1 i i_2 oraz $1000/T_1$ i $1000/T_2$ będące współrzędnymi punktów przecięć tego przedłużenia z osią OX i OY (patrz. rysunek 2). W celu określenia wartości przerwy energetycznej E_G należy skorzystać ze wzoru (2):

$$E_G = \frac{\ln \frac{i_1}{i_2} \cdot 2000k}{\frac{1000}{T_1} - \frac{1000}{T_2}} \quad (2)$$

gdzie: k – stała Boltzmanna = $8,625 \cdot 10^{-5}$ eV/K



Rysunek 2.2 Przykładowy wykres zależności $\ln(i) = f(1000/T_p)$ wraz z wykreśloną styczną, wyznaczającą wartości i_1 , i_2 oraz $1000/T_1$, $1000/T_2$.

Drugą metodą możliwą do wykorzystania w celu określenia wartości przerwy energetycznej jest wykonanie w arkuszu kalkulacyjnym aproksymacji liniowej prostoliniowego odcinka wykresu $\ln(I_a) = f(1000/T_{pk})$, a następnie odczytanie z parametrów tej aproksymacji wartości współczynnika kierunkowego. Należy jednak

pamiętać, że wartości prądów są przedstawione w postaci logarytmicznej w związku z powyższym należy wybrać aproksymację wykładniczą. Wartość przerwy energetycznej obliczamy wtedy ze wzoru (3).

$$E_G = a \cdot 2000k \quad (3)$$

gdzie: a – wartość współczynnika kierunkowego prostej

Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele wyników przeprowadzonych pomiarów,
- przykładowe obliczenia
- charakterystyki $\ln(i) = f(1000/T)$
- wartości przerwy energetycznej E_G
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 11

Badanie ogniw fotowoltaicznych wykonanych w różnych technologiach

Lublin 2025 r.

103



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest szczegółowa analiza i porównanie sprawności ogniw fotowoltaicznych wykonanych w różnych technologiach, takich jak ogniwa monokrystaliczne, polikrystaliczne oraz wielozłączowe. Ćwiczenie ma na celu zbadanie wpływu zastosowanych materiałów i technologii produkcji na efektywność konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną.

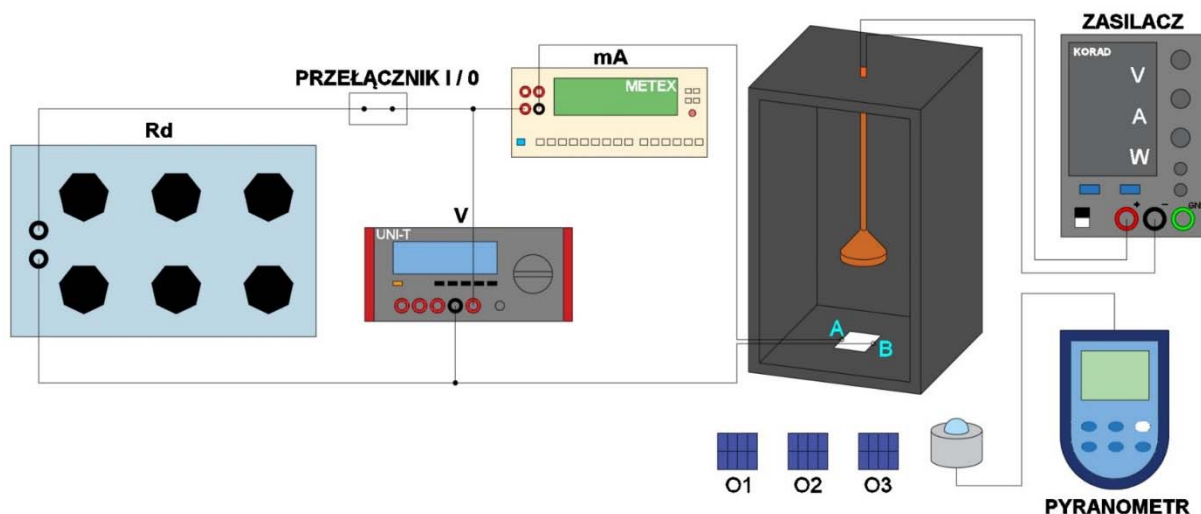
Zakres ćwiczenia

W ramach ćwiczenia przeprowadzone zostaną badania ogniw fotowoltaicznych wykonanych w różnych technologiach, takich jak ogniwa monokrystaliczne, polikrystaliczne oraz wielozłączowe. Badania obejmą pomiar kluczowych parametrów elektrycznych, w tym napięcia obwodu otwartego (V_{oc}), prądu zwarcowego (I_{sc}), mocy maksymalnej (P_{max}) oraz współczynnika wypełnienia (FF). Ćwiczenie uwzględni również analizę wpływu warunków pracy ogniw słonecznych, takich jak intensywność światła, na ich sprawność.

Na podstawie wykonanych pomiarów zostaną opracowane charakterystyki prądowo-napięciowe oraz mocy w zależności od rezystancji obciążenia R_d , co pozwoli na wyznaczenie optymalnej rezystancji dopasowania obciążenia R_{opt} . W szczególności analizie poddana zostanie efektywność konwersji energetycznej, w celu określenia, który typ ogniw fotowoltaicznych osiąga najlepsze wyniki w różnych warunkach oświetleniowych.

Uzyskane wyniki pomiarów i analizy umożliwią głębsze zrozumienie zależności pomiędzy strukturą materiałów a ich właściwościami elektrycznymi, co jest kluczowe dla optymalizacji wydajności systemów fotowoltaicznych oraz ich praktycznego zastosowania.

Stanowisko pomiarowe



Rysunek. 1. Schemat układu do pomiaru właściwości ogniw fotowoltaicznych.

W układzie pomiarowym zostały wykorzystane następujące elementy:

- Zasilacz KORAD U202
- miliwoltomierz cyfrowy Unit-T UT803,
- miliamperomierz cyfrowy Metex MXD-4660A,
- Foto-radiometr Delta OHM HD2302.0 z przetwornikiem promieniowania;
- Jako obciążenie w obwodzie pomiarowym wykorzystany został rezystor dekadowy o zakresie rezystancji $(0 \div 1) \text{ M}\Omega$.

Wykonanie ćwiczenia

Pomiar charakterystyk prądowo napięciowych

Pomiary należy przeprowadzić dla trzech ogniw fotowoltaicznych wykonanych w różnych technologiach, takich jak ogniwa monokrystaliczne, polikrystaliczne oraz wielozłączowe zgodnie z układem przedstawionym na rysunku 1. Dla trzech zadanych przez prowadzącego zajęcia napięć zasilających lampę halogenową (odpowiadającym trzem wartościom natężenia promieniowania słonecznego) w zakresie od 2V do 12V wykonać pomiary prądu i napięcia dla wartości rezystancji obciążenia R_d w zakresie od 10Ω do $1\text{M}\Omega$, podanych w tabeli 1. Następnie dla każdej zmierzonej wartości napięć zasilających (natężenia promieniowania), należy również

zmierzyć prąd zwarcia I_{ZF} oraz napięcie jałowe ogniwa U_{0F} . Aby wykonać ćwiczenie, należy wykonać następujące kroki:

36. Pomiary wykonywane są dla trzech napięć zasilania lampki halogenowej (U_{z1} , U_{z2} , U_{z3}) w zakresie od 2V do 12V. Wartości napięć określa prowadzący ćwiczenia przed wykonaniem ćwiczenia. Wartości napięć należy zapisać w tabeli 1.
37. Na zasilaczu ustawić zadaną wartość napięcia zasilania U_{z1} lampki halogenowej.
38. W miejscu zacisków **AB** (oznaczonych na rysunku 1) umieścić przetwornik promieniowania (czujnik pyranometru), tak aby źródło światła skierowane było prostopadle do czujnika pyranometru (żarówka halogenowa znajduje się nad czujnikiem). Odczytać wartość irradiancji w jednostkach W/m^2 i zapisać w tabeli 1.
39. Pomiary wykonać dla pozostałych wartości napięcia zasilania (U_{z2} , U_{z3}).
40. W miejsce zacisków **AB** (oznaczonych na rysunku 1) podłączyć ogniwo **O1** (ogniwo monokrystaliczne).
41. Na zasilaczu ustawić zadaną wartość napięcia zasilania U_{z1} lampki halogenowej.
42. Ustawić **przełącznik 1** w pozycji „1”.
43. Na rezystorze dekadowym R_d ustawić wymaganą wartość rezystancji, zgodnie z tabelą 1.
7. Odczytać wartość prądu I_1 na amperomierzu oraz wartość napięcia U_1 na woltomierzu, a następnie zapisać wynik w tabeli 1.
44. Powtórzyć pomiar dla wszystkich wartości rezystancji R_d .
45. Dla określonego napięcia zasilania lampki halogenowej U_{z1} , należy dokonać pomiaru prądu zwarcia I_{ZF} , ustawiając wartość rezystancji R_d na wartość „0”, ustawiając **przełącznik 1** w pozycji „1” (stan zwarcia). Należy odczytać wartość prądu zwarcia I_{ZF} na amperomierzu i zapisać wynik w tabeli 4.
46. Dla określonego napięcia zasilania lampki halogenowej U_{z1} , należy dokonać pomiaru napięcia jałowego U_{0F} , ustawiając wartość rezystancji R_d na wartość „0”, ustawiając **przełącznik 1** w pozycji „0” (stan jałowy). Odczytać wartość napięcia jałowego U_{0F} na woltomierzu i zapisać wynik w tabeli 4.

47. Powtórzyć pomiary dla pozostałych wartości napięcia zasilającego (U_{z2} , U_{z3}), wykonując czynności od punktu 6 i zapisując wyniki w tabelach 1 oraz 4.

48. Pomiary powtórzyć dla pozostałych ogniw fotowoltaicznych (**O2**, **O3**), zaczynając pomiary od punktu 5. Wyniki badań zapisać w tabelach 1-4.

Tabela 1. Charakterystyka prądowo napięciowa ogniwa monokrystalicznego

Ogniwo monokrystaliczne – O1										
Lp.		$U_{z1} = \dots\dots\dots V$ $E_1 = \dots\dots\dots W/m^2$			$U_{z2} = \dots\dots\dots V$ $E_2 = \dots\dots\dots W/m^2$			$U_{z3} = \dots\dots\dots V$ $E_3 = \dots\dots\dots W/m^2$		
	R_d	I_1	U_1	P_1	I_2	U_2	P_2	I_3	U_3	P_3
	Ω	mA	V	mW	mA	V	mW	mA	V	mW
1.	10									
2.	20									
3.	30									
4.	40									
5.	50									
6.	60									
7.	80									
8.	100									
9.	120									
10.	150									
11.	200									
12.	300									
13.	400									
14.	500									
15.	700									
16.	1 000									
17.	1 500									
18.	2 000									
19.	4 000									
20.	6 000									
21.	8 000									
22.	10 000									

Tabela 2. Charakterystyka prądowo napięciowa ogniwa polikrystalicznego

Ogniwo polikrystaliczne – O2										
Lp.		$U_{z1} = \dots\dots\dots V$ $E_1 = \dots\dots\dots W/m^2$			$U_{z2} = \dots\dots\dots V$ $E_2 = \dots\dots\dots W/m^2$			$U_{z3} = \dots\dots\dots V$ $E_3 = \dots\dots\dots W/m^2$		
	R_d	I_1	U_1	P_1	I_2	U_2	P_2	I_3	U_3	P_3
	Ω	mA	V	mW	mA	V	mW	mA	V	mW
1.	10									
2.	20									
3.	30									
4.	40									
5.	50									
6.	60									
7.	80									
8.	100									
9.	120									
10.	150									
11.	200									
12.	300									
13.	400									
14.	500									
15.	700									
16.	1 000									
17.	1 500									
18.	2 000									
19.	4 000									
20.	6 000									
21.	8 000									
22.	10 000									

Tabela 3. Charakterystyka prądowo napięciowa ogniwa wielozłączonego.

Ogniwo wielozłączone – O3										
Lp.		$U_{z1} = \dots\dots\dots V$ $E_1 = \dots\dots\dots W/m^2$			$U_{z2} = \dots\dots\dots V$ $E_2 = \dots\dots\dots W/m^2$			$U_{z3} = \dots\dots\dots V$ $E_3 = \dots\dots\dots W/m^2$		
	R_d	I_1	U_1	P_1	I_2	U_2	P_2	I_3	U_3	P_3
	Ω	mA	V	mW	mA	V	mW	mA	V	mW
1.	10									
2.	20									
3.	30									
4.	40									
5.	50									
6.	60									
7.	80									
8.	100									
9.	120									
10.	150									
11.	200									
12.	300									
13.	400									
14.	500									
15.	700									
16.	1 000									
17.	1 500									
18.	2 000									
19.	4 000									
20.	6 000									
21.	8 000									
22.	10 000									

Tabela 4. Prąd zwarcia oraz napięcie jałowe badanych ogniw.

Napięcia zasilania	Ogniwo monokrystaliczne			Ogniwo polikrystaliczne			Ogniwo wielozłączone		
	I_{ZF}	U_{0F}	FF	I_{ZF}	U_{0F}	FF	I_{ZF}	U_{0F}	FF
	mA	V	-	mA	V	-	mA	V	-
$U_{z1} = \dots\dots\dots V$									
$U_{z2} = \dots\dots\dots V$									
$U_{z3} = \dots\dots\dots V$									

Oznaczenia w tabelach:

- R_d - rezystancja obciążenia w obwodzie pomiarowym,
- U_z - napięcie zasilania żarówki halogenowej,
- I_1 - prąd płynący przez rezystancję obciążenia,
- U_1 - spadek napięcia na rezystancji obciążenia,
- P - moc w obwodzie.
- I_{ZF} - prąd zwarcia fotoogniwa,
- U_{OF} - napięcie jałowe fotoogniwa.
- E - natężenie promieniowania.
- FF - współczynnik wypełnienia (ang. *Fill Factor*).

Opracowanie wyników

Wyznaczanie charakterystyk prądowo-napięciowych i rezystancji dopasowania

Na podstawie uzyskanych wyników (tabele 1-3) należy wykreślić charakterystyki prądowo-napięciowe $I = f(U)$ dla trzech ogniw fotowoltaicznych tj. ogniwa monokrystaliczne, polikrystaliczne oraz wielozłączowe. Charakterystyki prądowo-napięciowe dla różnych napięć zasilających powinny być przedstawione na wspólnym wykresie w skali liniowej. Aby wyznaczyć charakterystyki mocy w zależności od rezystancji obciążenia R_d należy skorzystać ze wzoru:

$$P(R_d) = U \cdot I \quad (1)$$

Wyniki obliczeń mocy zapisać w tabelach 1-3. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń, na wspólnym wykresie, należy przedstawić zależność mocy od rezystancji obciążenia $P = f(R_d)$ dla każdej wartości natężenia promieniowania. Wykresy powinny być wykonane w skali logarytmicznej, ze względu na szeroki zakres zadanych rezystancji obciążenia. Na podstawie sporządzonych wykresów należy wyznaczyć wartość optymalnej rezystancji dopasowania obciążenia R_{opt} .

Wyznaczanie sprawności ogniw fotowoltaicznych

Dla uzyskanych wartości maksymalnych mocy należy policzyć sprawność

110



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

poszczególnych ogniw korzystając ze wzoru (2) i zanotować w tabeli 5.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{light}} \quad (2)$$

gdzie: P_{max} – najwyższa moc ogniwa P_{light} – moc świetlna padająca na ogniwo.

Moc świetlna padająca na ogniwo obliczamy ze wzoru (3):

$$P_{light} = E \cdot A \quad (3)$$

gdzie: E – natężenie promieniowania świetlnego, A – powierzchnia ogniwa

Współczynnik FF (ang. *Fill Factor*) w kontekście ogniw fotowoltaicznych jest miarą jakości ogniwa i wskazuje, jak efektywnie ogniwo fotowoltaiczne przekształca światło słoneczne na energię elektryczną. FF jest jednym z kluczowych parametrów charakteryzujących ogniwo fotowoltaiczne obok napięcia jałowego (U_{oc}), prądu zwarciovego (I_{sc}) oraz mocy maksymalnej (P_{max}).

Współczynnik FF możemy obliczyć ze wzoru i zapisać w tabeli 4 dla każdego napięcia zasilania lamki halogenowej:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{ZF} \cdot U_{OF}} \quad (4)$$

gdzie: P_{max} - moc maksymalna ogniwa (moc uzyskana przy optymalnym obciążeniu), U_{oc} - napięcie jałowe (napięcie ogniwa, gdy nie jest obciążone), I_{sc} - prąd zwarciovowy.

Po obliczeniu współczynników FF dla różnych napięć zasilania lamką halogenową należy policzyć wartość średnią i zapisać w tabeli 5. Na podstawie uzyskanych wyników i charakterystyk opracować wnioski z wykonanego ćwiczenia.

Tabela 5. Powierzchnia i obliczenia sprawności ogniw fotowoltaicznych

Rodzaj ogniwa	A	FF_{sr}	Sprawność η
	m ²	-	-
Monokrystaliczne	0,00385		
Polikrystaliczne	0,00151		
Wielozłączowe	0,0001		

Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele wyników przeprowadzonych pomiarów,
- przykładowe obliczenia,
- wykresy zależności: $I = f(U)$, $P = f(R_d)$, dla wszystkich badanych ogniw fotowoltaicznych,
- obliczenia współczynnika FF oraz sprawności dla wszystkich badanych ogniw fotowoltaicznych,
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników.

LABORATORIUM

MATERIAŁOZNAWSTWO ELEKTROTECHNICZNE

Ćwiczenie nr 12

Badanie wodorowych ogniw paliwowych

Lublin 2025 r.

113



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest określenie kluczowych parametrów pracy ogniwa wodorowego poprzez wyznaczenie jego charakterystyk prądowo-napięciowych oraz identyfikację punktu maksymalnej mocy. Zadanie umożliwia ocenę efektywności ogniwa oraz analizę jego działania w różnych warunkach pracy.

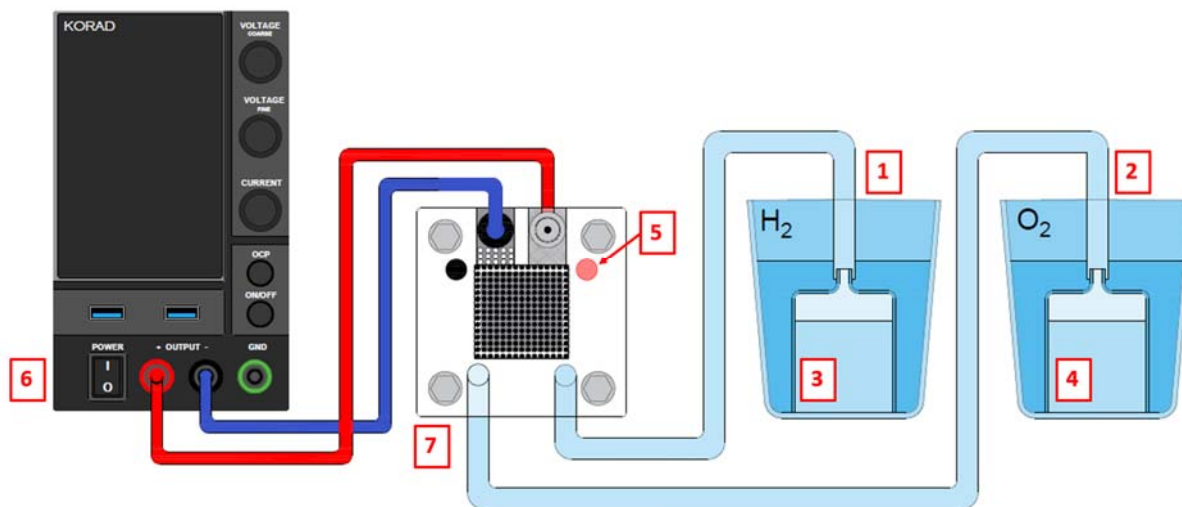
Zakres ćwiczenia

Zakres pracy obejmuje kilka kluczowych etapów, mających na celu kompleksowe zbadanie działania ogniwa wodorowego. Pierwszym krokiem jest obserwacja procesu generowania wodoru i tlenu za pomocą odwracalnego ogniwa wodorowego. W tym etapie wykorzystane zostaną pojemniki o objętości 60 ml do magazynowania wytworzonych gazów, co zapewni ich wystarczającą ilość do dalszych badań.

Następnie przeprowadzone zostanie wyznaczenie charakterystyk prądowo-napięciowych ogniwa w celu określenia punktu maksymalnej mocy. Wodór i tlen zgromadzone w poprzednim etapie posłużą jako paliwo do zasilania ogniwa, które zostanie poddane różnym obciążeniom za pomocą rezystora dekadowego. Zastosowanie zmiennych obciążeń pozwoli na wyznaczenie punktu pracy ogniwa, w którym osiąga ono maksymalną moc. Etap ten umożliwi szczegółową analizę zmian parametrów pracy ogniwa w zależności od warunków obciążenia, co pozwoli na lepsze zrozumienie jego efektywności.

Ostatni etap będzie polegał na ponownym wytworzeniu 60 ml wodoru, po czym ogniwo zostanie obciążone rezystancją wyznaczoną w poprzednim etapie jako optymalną dla osiągnięcia maksymalnej mocy. Na podstawie uzyskanych pomiarów zostanie obliczona sprawność ogniwa paliwowego. Pozwoli to na precyzyjne określenie efektywności przekształcania energii chemicznej w energię elektryczną przy pracy ogniwa w warunkach maksymalnej wydajności.

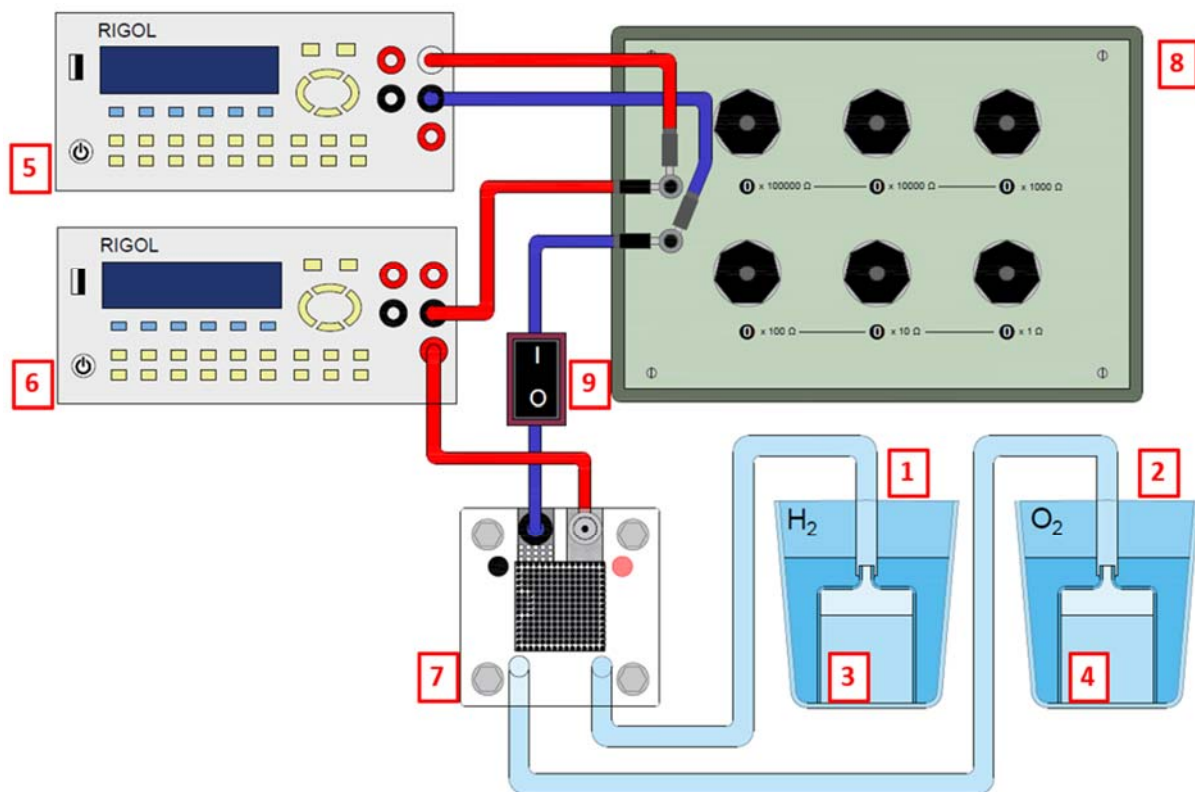
Stanowisko pomiarowe



Rysunek 1. Widok stanowiska laboratoryjnego do tworzenia wodoru i tlenu za pomocą odwracalnego ogniwa wodorowego

Oznaczenia do rysunku 1:

- 1 – zewnętrzny zbiornik do przechowywania wodoru,
- 2 – zewnętrzny zbiornik do przechowywania tlenu,
- 3 – wewnętrzny zbiornik do przechowywania wodoru,
- 4 – wewnętrzny zbiornik do przechowywania tlenu,
- 5 – zawór do nawadniania ogniwa wodorowego,
- 6 – zasilacz laboratoryjny,
- 7 – ogniwo wodorowe.



Rysunek 2. Widok stanowiska laboratoryjnego do badania charakterystyki prądowo napięciowej ogniwa wodorowego w zależności od obciążenia oraz badania sprawności

Oznaczenia do rysunku 2:

- 1 – zewnętrzny zbiornik do przechowywania wodoru,
- 2 – zewnętrzny zbiornik do przechowywania tlenu,
- 3 – wewnętrzny zbiornik do przechowywania wodoru,
- 4 – wewnętrzny zbiornik do przechowywania tlenu,
- 5 – multimetr RIGOL wskazujący napięcie ogniwa,
- 6 – multimetr RIGOL wskazujący natężenie prądu ogniwa,
- 7 – ogniwo wodorowe,
- 8 – rezystor dekadowy,
- 9 – przełącznik do włączania ogniwa.

W niniejszym ćwiczeniu wykorzystano stanowisko, którego schemat przedstawiono na rysunku 1, do wytworzenia wodoru oraz tlenu, które będą wykorzystywane w dalszej części ćwiczenia. Stanowisko, przedstawione na rysunku 2, umożliwia wyznaczenie zależności prądowo-napięciowej ($I = f(U)$) ogniwa wodorowego,

korzystając z gazów wytworzonych w pierwszym etapie ćwiczenia. Proces ten pozwala na określenie punktu maksymalnej mocy ogniwa w zależności od obciążenia, co stanowi podstawę do dalszego badania i obliczeń sprawności ogniwa.

Wykonanie ćwiczenia

Przygotowanie ogniwa do tworzenia wodoru i tlenu

- przygotować stanowisko do wytwarzania gazów zgodnie z rysunkiem 1,
- sprawdzić stan połączeń węży odprowadzających gazy z ogniwa,
- na bocznej stronie zewnętrznego zbiornika do przechowywania wodoru (1) i zewnętrznego zbiornika do przechowywania tlenu (2) znajduje się naniesiona miarka objętości. Należy wlać odpowiednią ilość wody destylowanej do obu zbiorników, tak aby osiągnąć linię oznaczoną jako 0,
- zbiorniki wewnętrzne do przechowywania gazów (3, 4) wyposażone są w dwa rowki na spodzie, które umożliwiają odprowadzanie nadmiaru gazu. Ich zadaniem jest zapobieganie wzrostowi ciśnienia podczas procesu elektrolizy. Należy zamocować zbiorniki do przechowywania gazu do podstawy zbiornika na wodór (1) oraz zbiornika na tlen (2), upewniając się, że rowki pozostają odsłonięte. Przed rozpoczęciem procesu upewnij się, że oba zbiorniki (1, 2) są całkowicie wypełnione destylowaną wodą,
- strzykawka dołączona do zestawu powinna zostać ustawiona tak, aby tłok został przesunięty maksymalnie w jedną stronę, co otwiera całą przestrzeń wewnętrzną. Następnie tłok należy przesunąć do oporu w przeciwną stronę, zamykając przestrzeń. W ten sposób należy upewnić się, że wewnątrz strzykawki nie znajdują się żadne zanieczyszczenia, takie jak drobne ciała stałe czy płyny. Po wykonaniu tych czynności odwracalne ogniwo paliwowe może zostać przygotowane do nawodnienia,
- należy zdjąć czerwone mocowanie węża (5) przymocowanej do górnej prawej dyszy, a następnie włożyć końcówkę strzykawki do otwartego końca tej rurki. Powoli odciągnąć tłok strzykawki, umożliwiając zasysanie wody destylowanej ze zbiornika przechowywania tlenu przez gumową rurkę, co spowoduje wypełnienie wodą strony z tlenem w odwracalnym ogniwie paliwowym. Należy

zatrzymać ruch tłoka, gdy destylowana woda zacznie przedostawać się do strzykawki. Następnie należy odłączyć strzykawkę od gumowego węża i ponownie zamocować czerwony uchwyt w otworze,

- prawidłowe nawodnienie musi zostać zapewnione, ponieważ proces elektrolizy opiera się na rozszczepianiu wody dostarczanej do ogniwa. Woda jest absorbowana przez membranę znajdującą się wewnątrz ogniwa, dlatego konieczne jest, aby była obecna przez cały czas trwania elektrolizy. Wyschnięcie membrany może spowodować trwałe uszkodzenie odwracalnego ogniwa paliwowego,
- należy pozostawić odwracalne ogniwo paliwowe na około 5 minut, pozwalając membranie na wchłonięcie wystarczającej ilości destylowanej wody,
- zaleca się przeprowadzenie kontroli poprawności połączeń wszystkich przewodów, aby upewnić się, że zostały one właściwie podłączone zgodnie ze schematem. Należy pamiętać o tym, aby przewody były właściwie połączone, ponieważ odwrotna polaryzacja może doprowadzić do całkowitego i nieodwracalnego **uszkodzenia** ogniwa paliwowego,
- włączyć zasilacz laboratoryjny (6) poprzez ustawienie przycisku „power” w pozycji 1,
- ustawić napięcie wynoszące 2 V oraz ograniczyć wartość natężenia prądu do 0,7 A, następnie uruchomić zasilacz przyciskiem ON/OFF,
- podczas prawidłowego działania ogniwa należy zaobserwować pojawiające się pęcherzyki gazu wewnątrz ogniwa. Gazy gromadzą się w zbiornikach: w zbiorniku do przechowywania wodoru (3) oraz w zbiorniku do przechowywania tlenu (4), wypierając wodę, co powoduje wzrost poziomu wody w tych zbiornikach,
- proces tworzenia gazów należy zakończyć w chwili, gdy ilość zmagazynowanego wodoru wyniesie 60 ml. W takiej sytuacji należy wyłączyć zasilacz laboratoryjny (6), poprzez ustawienie przycisku *power* w pozycji 0.

Zbadanie charakterystyki prądowo napięciowej oraz określenie maksymalnego punktu mocy w zależności od obciążenia ogniwa

- przygotować stanowisko do badania charakterystyk prądowo napięciowych zgodnie z rysunkiem 2,
- upewnić się, że przełącznik (9) jest ustawiony w pozycji 0,
- sprawdzić stan połączeń węży odprowadzających gazy z ogniwa,
- upewnić się, że multimetr (6) jest ustawiony do pomiaru natężenia prądu elektrycznego ogniwa,
- upewnić się, że multimetr (5) jest ustawiony do pomiaru napięcia elektrycznego ogniwa,
- rezystor dekadowy (8) należy ustawić w taki sposób, aby rezystancja wynosiła 100000 Ω . Jest to wykonywane za pomocą pokręteł,
- należy przełącznikiem (9) włączyć ogniwo, odczytać wartości napięcia oraz natężenia prądu ogniwa z multimetrów (5) i (6) oraz zanotować wynik w tabeli 1,
- następnie wybrać kolejną wartość rezystancji z tabeli 1, ustawić tę wartość na rezystorze dekadowym (8) i analogicznie do poprzedniego punktu, wyniki napięcia oraz natężenia prądu ogniwa zanotować w tabeli 1.
- w ten sam sposób należy dokonać pomiarów dla pozostałych wartości rezystancji umieszczonych w tabeli 1.

Przygotowanie stanowiska do wyznaczenia sprawności ogniwa wodorowego

- aby obliczyć sprawność ogniwa należy wytworzyć tyle wodoru, aby jego ilość wynosiła 60 ml. Kroki niezbędne do wytworzenia gazów zostały opisane w punkcie „Przygotowanie ogniwa do tworzenia wodoru i tlenu”,
- podczas procesu tworzenia wodoru, należy znaleźć moc maksymalną ogniwa $P_{\max}$. W tym celu, należy obliczyć moc dla każdej wartości rezystancji i wyniki zapisać w tabeli 1 korzystając ze wzoru:

$$P = U \cdot I$$

gdzie: P – moc ogniwa, U – napięcie ogniwa, I – natężenie prądu ogniwa.

W celu wyznaczenia wartości $P_{\max}$ należy z obliczonych wartości wybrać wartość największą która jest tzw. punktem pracy ogniwa,

- po wykonaniu obliczeń i wytworzeniu dokładnie 60 ml wodoru należy przygotować stanowisko do badania sprawności ogniwa wodorowego zgodnie z rysunkiem 2.
- na rezystorze dekadowym należy ustawić wartość rezystancji, dla której obliczono $P_{\max}$. Następnie przełącznikiem (9) należy włączyć ogniwo oraz zacząć mierzyć czas stoperem.
- czas należy mierzyć do momentu skończenia się wodoru w zbiorniku (3), wynik należy zanotować w tabeli 2,
- po zakończeniu ćwiczenia należy wyłączyć ogniwo przełącznikiem (9).
- zanotować w tabeli 3 parametry atmosferyczne panujące w laboratorium.

Tabela 1. Wyniki pomiarów natężenia prądu oraz napięcia w funkcji rezystancji dla ogniwa wodorowego.

L.P.	Rezystancja	Natężenie prądu	Napięcie	Moc
	Ω	A	V	W
1.	100000			
2.	10000			
3.	1000			
4.	800			
5.	600			
6.	400			
7.	200			
8.	100			
9.	50			
10.	10			

Tabela 2. Wyniki pomiaru czasu trwania pracy ogniwa w warunkach punktu maksymalnej pracy.

Rezystancja	Natężenie prądu	Napięcie	Moc	Czas
Ω	A	V	W	s

Tabela 3. Parametry atmosferyczne potrzebne do obliczenia liczby moli wodoru.

Objętość wodoru V	Ciśnienie P	Temperatura
m^3	Pa	K
0,00006		

Opracowanie wyników

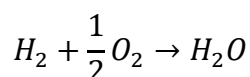
Na podstawie uzyskanych wyników należy obliczyć sprawność ogniwa wodorowego według wzoru:

$$\eta = \frac{E_{el}}{E_{ch}} \cdot 100\%$$

gdzie: η – sprawność, E_{el} – energia elektryczna ogniwa, E_{ch} – energia chemiczna paliwa. W pierwszym kroku należy obliczyć energię chemiczną ogniwa na podstawie entalpii reakcji:

$$E_{ch} = n \cdot \Delta H$$

gdzie: n – liczba moli paliwa, ΔH – entalpia reakcji (J/mol). Dla ogniwa wodorowego reakcja to:



Entalpia reakcji ΔH wynosi 286 kJ/mol. Liczbę moli paliwa obliczamy według wzoru:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

gdzie: P – ciśnienie w Pa, V – objętość wodoru w m^3 , R – stała gazowa (8,314 J/(mol·K)), T – temperatura w K. Następnie należy obliczyć energię elektryczną E_{el} . Aby to zrobić należy skorzystać ze wzoru:

$$E_{el} = P \cdot t$$

gdzie: P – moc w W, t – czas w s. Dodatkowo po obliczeniu sprawności należy przedstawić charakterystykę mocy w funkcji rezystancji. Następnie należy opracować

wnioski z wykonanego ćwiczenia.

Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- stronę tytułową,
- schematy układów pomiarowych,
- tabelę wyników pomiarów natężenia prądu oraz napięcia w funkcji rezystancji dla ogniwa wodorowego wraz z obliczonymi mocami,
- wynik maksymalnego punktu mocy ogniwa wodorowego,
- charakterystykę mocy w funkcji rezystancji $P(R)$ ogniwa,
- obliczenia sprawności η ogniwa,
- uwagi i wnioski z przeprowadzonych pomiarów.