

LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Podstawy teoretyczne do ćwiczenia **nr 14**

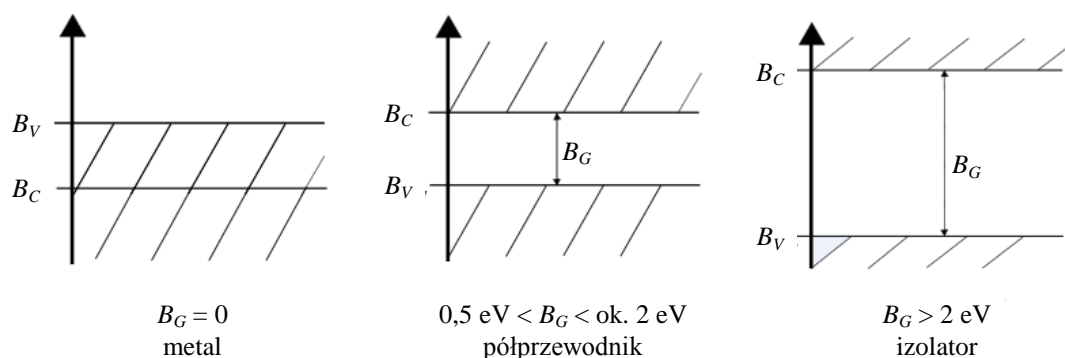
Wyznaczanie temperaturowych zależności prądu
wstecznego diod wykonanych z różnych materiałów
półprzewodnikowych

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zbadanie temperaturowych właściwości złączy p - n, wykonanych z różnych materiałów półprzewodnikowych oraz badanie prostowników niesterowanych.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

Półprzewodniki są to ciała stałe o budowie krystalicznej, których szerokość pasma wzbronionego w modelu pasmowym, określającym energetyczne stany elektronów jest zawarta w granicach od 0,5 eV do 2,0 eV.



Rys. 1. Uproszczony model energetyczny ciała stałego, gdzie: B_C - pasmo przewodnictwa (conduction band), B_G - przerwa zabroniona (band gap), B_V - pasmo walencyjne (valence band)

Rezystywność tych materiałów jest większa niż rezystywność przewodników oraz mniejsza niż rezystywność izolatorów, na przykład:

- miedź (przewodnik) ma rezystywność $10^{-8} \Omega \cdot m$,
- krzem (półprzewodnik) ma rezystywność ok. $2 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$,
- mika (izolator) ma rezystywność rzędu $10^{14} \Omega \cdot m$.

2.1. Półprzewodniki samoistne

Przewodnictwo chemiczne czystych (bezdomieszkowych) półprzewodników nazywamy przewodnictwem samoistnym, zaś same półprzewodniki - półprzewodnikami samoistnymi.

Podstawową właściwością półprzewodników jest to, że dla ich przewodnictwa elektrycznego potrzebny jest czynnik aktywizujący:

- temperatura,
- napromieniowanie,
- silne pole elektryczne.

Przewodnictwo pojawia się tylko pod wpływem zewnętrznego czynnika jonizującego, który jest w stanie przenieść elektrony z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Do pasma

przewodnictwa trafia stosunkowo niewielka liczba elektronów z pasma walencyjnego. Elektrony, które dostały się do pasma przewodnictwa zajmują przede wszystkim najniższe poziomy, położone na dnie tego pasma.

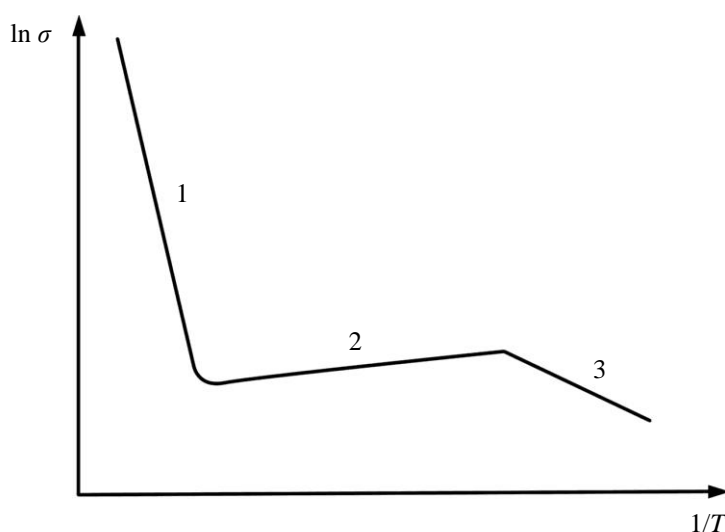
W temperaturze zera bezwzględnego takie ciała powinny posiadać zerowe przewodnictwo elektryczne, tzn. powinny być izolatorami. Jednakże ze wzrostem temperatury, wskutek termicznego wzbudzenia elektronów pasma walencyjnego, mogą uzyskać energię wystarczającą do przejścia do pasma przewodnictwa. Pasma przewodnictwa będzie wówczas częściowo wypełnione, natomiast w paśmie walencyjnym, dotąd całkowicie obsadzonym, pojawiają się poziomy nieobsadzone i ruch elektronów staje się w nim możliwy. Im mniejsza jest szerokość pasma wzbronionego i im wyższa temperatura kryształu, tym więcej elektronów przechodzi do pasma przewodnictwa i tym więcej nieobsadzonych poziomów tworzy się w paśmie walencyjnym.

Pojawienie się pustych (nieobsadzonych) poziomów w paśmie walencyjnym umożliwia powstanie kolektywnego ruchu elektronów tego pasma pod wpływem pola zewnętrznego. Nieobsadzone miejsca w paśmie walencyjnym nazywane są dziurami. Dziury w polu elektrycznym zachowują się jak ładunki dodatnie.

Zachowanie się dziur i elektronów najwygodniej jest opisywać za pomocą pojęcia stanu, przypisując elektronom stany obsadzone w paśmie, natomiast dziurom stany nieobsadzone. W paśmie przewodnictwa stany obsadzone przemieszczają się na tle stanów nieobsadzonych, zaś w paśmie walencyjnym stany nieobsadzone przemieszczają się na tle stanów obsadzonych.

Koncentracja elektronów i dziur w półprzewodniku samoistnym jest związana zależnością:

$$p_i = n_i \sim \exp \frac{-E_G}{2kT} \quad (1)$$



Rys. 2. Zależność konduktywności od temperatury odwrotnej (tzw. wykres Arrheniusa), gdzie: 1 - zakres generacji samoistnej, 2 - zakres stałej koncentracji nośników, 3 - zakres jonizacji domieszek

2.2. Półprzewodniki domieszkowane

Domieszkowanie to proces wprowadzania domieszek do kryształu półprzewodnika samoistnego.

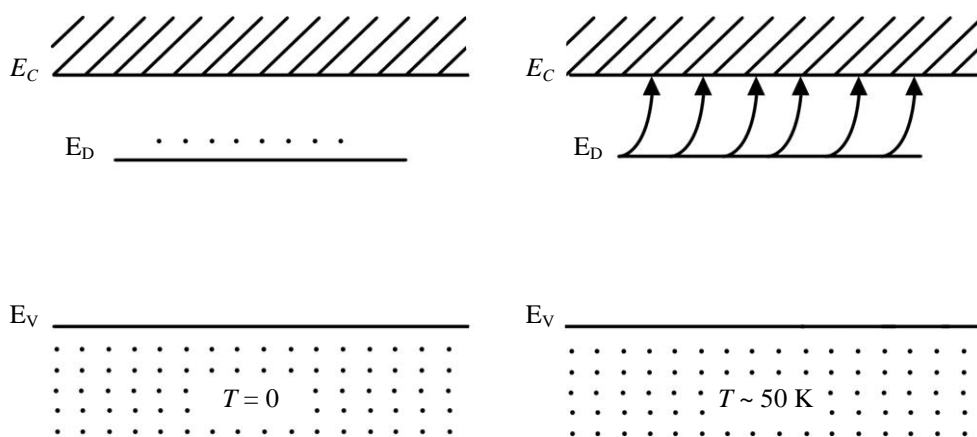
W odróżnieniu od półprzewodników samoistnych, w których przewodnictwo odbywa się jednocześnie za pośrednictwem elektronów i dziur, w półprzewodnikach domieszkowanych przewodnictwo jest uwarunkowane głównie przez nośniki o jednakowym znaku: w półprzewodnikach donorowych (półprzewodnikach typu n) przez elektrony, w półprzewodnikach akceptorowych (półprzewodnikach typu p) przez dziury. Nośniki te noszą nazwę większościowych.

Oprócz nośników większościowych w półprzewodnikach znajdują się także nośniki mniejszościowe: w półprzewodniku elektronowym - dziury, w półprzewodniku dziurowym - elektrony.

Domieszki powodują powstanie dodatkowych poziomów energetycznych w strukturze pasmowej, zwykle w przerwie wzbronionej między pasmem walencyjnym i pasmem przewodnictwa.

Domieszka donorów, tzn. atomów, które mają nadmiar elektronów w porównaniu z atomami sieci krystalicznej, wprowadza poziomy w pobliżu dna pasma przewodnictwa. Są to na przykład pierwiastki z V grupy układu okresowego (P, As, Sb) w Si i Ge.

Poziomy te są w temperaturze 0 K wypełnione elektronami. Niewielka energia cieplna wystarcza, aby przeszły one do pasma przewodnictwa (rysunek 3). Zatem w temperaturze od 50 do 100 K praktycznie wszystkie elektrony z poziomów domieszkowych przechodzą do pasma przewodnictwa. Takie poziomy domieszkowe nazywają się poziomami donorowymi, a domieszki z grupy V nazywane są donorami. Jest to materiał typu n.



Rys. 3. Przechodzenie elektronów z poziomu donorowego do pasma przewodnictwa

Energia przejścia z poziomu donorowego do pasma przewodnictwa jest dużo mniejsza niż energia pasma zabronionego ($E_D \ll E_G$).

Tabela 1. Wartości energii E_D oraz E_G dla poszczególnych domieszek

	E_D , eV			E_G , eV	
	P	As	Sb		
Si	0,0045	0,049	0,039	Si	1,1
Ge	0,012	0,013	0,0096	Ge	0,7

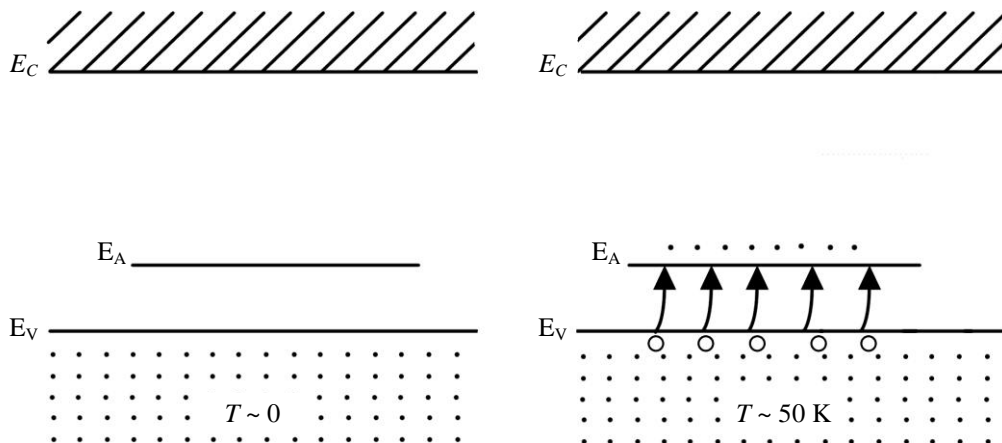
Natomiast domieszka akceptorów, tzn. atomów, które mają mniej elektronów niż atomy sieci krystalicznej, wprowadza poziomy w pobliżu wierzchołka pasma walencyjnego. Są to na przykład pierwiastki z III grupy układu okresowego (B, Al, Ga, In). W niskich temperaturach energia cieplna wystarcza do pobudzenia elektronów z pasma walencyjnego do przejścia na poziomy domieszkowe i pozostawienia za sobą dziur w paśmie walencyjnym (rysunek 4). Ponieważ te poziomy przyjmują (akceptują) elektrony z pasma walencyjnego, są nazywane poziomami akceptorowymi, a domieszki z grupy III są dla Ge i Si domieszkami akceptorowymi.

Domieszkowanie akceptorami tworzy półprzewodnik, w którym gęstość dziur jest znacznie większa niż gęstość elektronów w paśmie przewodnictwa. Jest to materiał typu p.

Dla półprzewodników domieszkowanych koncentrację nośników wyrażają równania:

$$p \cong B(T)\sqrt{N_A}e^{\left(-\frac{E_A}{2kT}\right)}, \quad (2)$$

$$n \cong B(T)\sqrt{N_D}e^{\left(-\frac{E_D}{2kT}\right)} \quad (3)$$



Rys. 4. Wychwytywanie elektronów z pasma walencyjnego przez poziom akceptorowy, powodujący powstawanie dziur w paśmie podstawowym

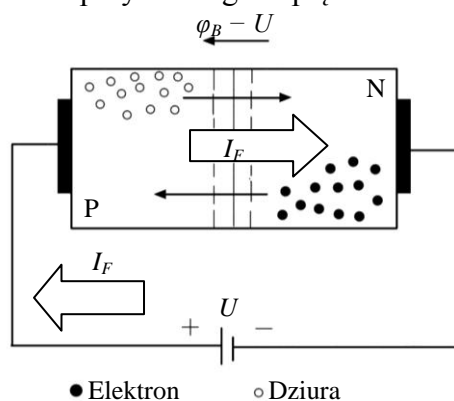
2.3. Złącze p - n

Złączem p - n nazywamy styk obszarów o różnym typie przewodnictwa, wytworzony w obrębie tego samego materiału półprzewodnikowego. Złącze takie otrzymuje się przez odpowiednie rozmieszczenie domieszek. Domieszki powodują powstanie dodatkowych poziomów energetycznych w strukturze pasmowej, zwykle w przerwie wzbronionej między pasmem podstawowym i pasmem przewodnictwa.

W obszarze domieszkowanym akceptorami, zwanym obszarem typu p, koncentracja swobodnych dziur przewyższa koncentrację elektronów. W materiale donorowym (typ n) koncentracja elektronów przewyższa koncentrację dziur. Na granicy obszarów n i p powstaje dipolowa warstwa ładunku

przestrzennego, zwana warstwą zubożoną lub warstwą zaporową. Siły elektrostatyczne wytwarzane przez ładunki jonów utrudniają dalszy ruch dyfuzyjny nośników większościowych, natomiast na nośniki mniejszościowe powstałe pole elektryczne działa przyspieszająco. Przez złącze płyną przeciwnie skierowane prądy dyfuzji oraz prądy unoszenia dziur i elektronów.

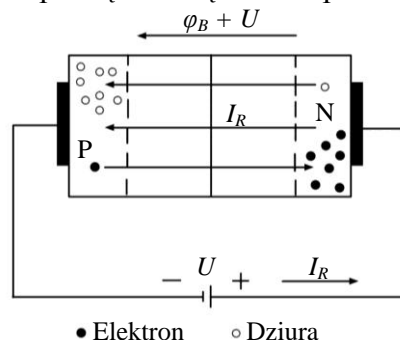
Zewnętrzne pole elektryczne może być przyłożone zgodnie lub przeciwnie z polem powstałym w złączu. Jeżeli zewnętrzne pole elektryczne przyłożone jest przeciwnie do pola złącza niespolaryzowanego, wówczas wysokość bariery potencjału obniża się, zwęża się obszar zubożony w nośniki. Jest to polaryzacja w kierunku przewodzenia. Prąd dyfuzji nośników większościowych gwałtownie wzrasta, wraz ze wzrostem przyłożonego napięcia.



Rys. 5. Polaryzacja złącza p - n w kierunku przewodzenia

Elektrony półprzewodnika typu n są odpychane przez biegun ujemny źródła w kierunku warstwy zaporowej i mogą łatwo przekroczyć barierę potencjału. Natomiast dziury półprzewodnika typu p są odpychane przez biegun dodatni źródła w kierunku złącza.

Jeżeli zewnętrzne pole elektryczne zostanie przyłożone zgodnie z polem, powstałym w złączu (plus napięcia źródła zasilającego dołączony do obszaru typu n, minus do obszaru typu p, napięcie traktujemy jako ujemne), to wówczas powiększa się bariera potencjału na złączu.



Rys. 6. Polaryzacja złącza p - n w kierunku zaporowym

Zjawisko to można wytłumaczyć w ten sposób, że biegun dodatni źródła odciąga elektrony obszaru n od złącza, a biegun ujemny odciąga dziury obszaru p od złącza, wobec czego w strefie złącza jest bardzo mało nośników ładunku elektrycznego, pozostają tylko jony nie przenoszące ładunku. Mówimy, że przy takim połączeniu złącze działa zaporowo. W kierunku zaporowym może płynąć minimalny

prąd, zwany prądem wstecznym. Prąd wsteczny spowodowany jest przepływem przez złącze tzw. nośników mniejszościowych, które powstają na skutek przejść elektronów pod wpływem temperatury z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia. Jest to podobne do powstawania nośników swobodnych w półprzewodniku samoistnym. W taki sposób w obszarze typu n pojawia się niewielka liczba dziur, a w obszarze typu p niewielka liczba elektronów. Nośniki mniejszościowe mogą swobodnie przechodzić przez złącze p - n, spolaryzowane w kierunku zaporowym. Natężenie prądu w tym przypadku, z dużym przybliżeniem, jest tyle razy mniejsze od natężenia prądu przewodzenia, ile razy mniejsza jest koncentracja nośników mniejszościowych w stosunku do nośników większościowych. Ponieważ powstawanie nośników mniejszościowych jest związane z przejściami elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia, wymuszonymi energią cieplną, natężenie prądu wstecznego wzrasta, wraz ze wzrostem temperatury.

Widać, że złącze p - n umożliwia przepływ prądu tylko w jednym kierunku, w kierunku przewodzenia, po przekroczeniu tzw. napięcia progowego $U_{(TO)}$. Wartość napięcia progowego zależy od rodzaju materiału półprzewodnikowego, z którego zostało wykonane złącze. Z dobrym przybliżeniem napięcie progowe możemy obliczyć z szerokości pasma zabronionego materiału złącza:

$$U_{(TO)} = \frac{E_G}{2} \quad (4)$$

Po przekroczeniu wartości $U_{(TO)}$ prąd przewodzenia zwiększa się bardzo szybko. Natomiast przy polaryzacji w kierunku zaporowym prąd jest bardzo mały - wiele tysięcy razy mniejszy niż w kierunku przewodzenia. Mówimy, że złącze p - n ma wartości prostownicze. Przy dużym napięciu wstecznym (po przekroczeniu tzw. napięcia przebicia $U_{(BR)}$) rozpoczyna się zjawisko przebicia lawinowego, a więc szybkie narastanie prądu przy prawie stałym napięciu na diodzie. Może to spowodować zniszczenie diody, jeżeli nie ograniczy się prądu przez włączenie szeregowo dodatkowej rezystancji. Charakterystyka prądowo - napięciowa diody opisywana jest wzorem:

$$i = C \exp\left(-\frac{\Delta E_G}{2kT}\right) \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{q \cdot V}{kT}\right) - 1 \right\}, \quad (5)$$

gdzie: i , V ze znakiem (+) dla kierunku przewodzenia oraz i , V ze znakiem (-) dla kierunku zaporowego.

Ze wzoru (5) wynika, że natężenie prądu przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym opisane jest zależnością:

$$i_{zap} = C \exp\left(-\frac{\Delta E_G}{2kT}\right), \quad (6)$$

gdzie: C - współczynnik słabo zależny od T .

Ponieważ przebieg funkcji exp jest stosunkowo trudny do wykreślenia, stosuje się tzw. wykres Arrheniusa, wprowadzając nowe zmienne $Y = \log(i_{zap})$ oraz $X = 1/T$. W matematyce taką operację nazywa się operacją linearyzacji lub wyrównaniem. W nowych współrzędnych wzór będzie funkcją liniową, ponieważ:

$$Y = \log C - \frac{\Delta E_G}{2000k} \cdot X, \quad (7)$$

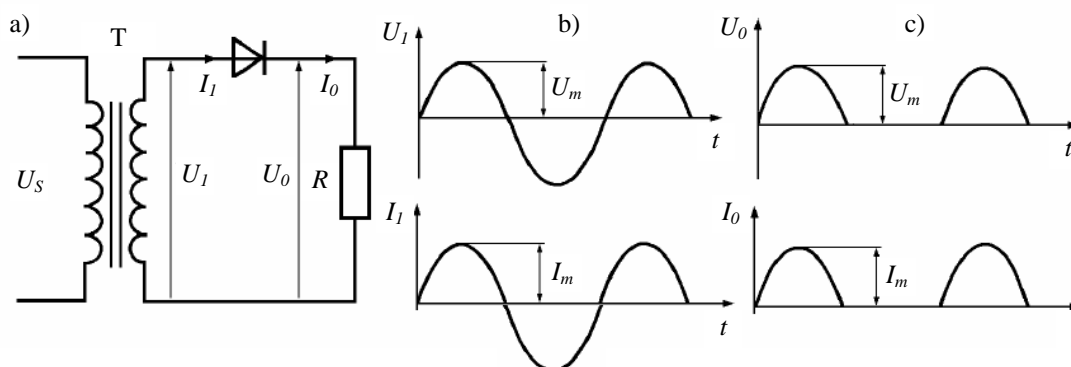
$$X = \frac{1000}{T}, \quad (8)$$

skąd otrzymujemy:

$$\Delta E_G = -2000 \cdot k \cdot \text{tg}\alpha \quad (9)$$

2.4. Prostowniki

Prostowniki są to urządzenia przetwarzające prąd przemienny na jednokierunkowy. Przy rozpatrywaniu zjawisk zachodzących w obwodach zawierających elementy prostownikowe stosuje się często uproszczenia polegające na tym, że rezystancję w stanie przewodzenia przyjmuje się równą zero, a rezystancję w stanie zaporowym równą nieskończoności.



Rys. 7. Prostownik jednopulsowy: a) schemat elektryczny, b) przebiegi czasowe napięcia i prądu przed prostownikiem, c) przebiegi czasowe napięcia i prądu za prostownikiem

Dla prostowników jednopulsowych prawdziwe są następujące zależności. Wartość średnia prądu przy prostowaniu półfalowym jest równa:

$$\bar{I} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \hat{I} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\hat{I}}{\pi}, \quad (10)$$

natomiast wartość skuteczna prądu jest równa:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \hat{I}^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{\hat{I}}{2} \quad (11)$$

Moc czynna i pozorna pobierana ze źródła jest równa:

$$P = \frac{R}{4} \cdot \hat{I}^2, \quad (12)$$

$$S = \frac{R}{2\sqrt{2}} \cdot \hat{I}^2 \quad (13)$$

Współczynnik mocy jest równy:

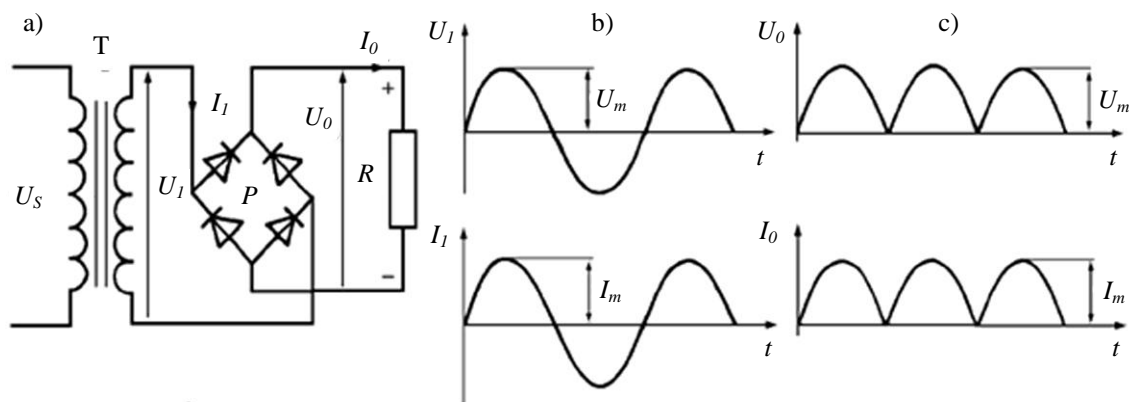
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707 \quad (14)$$

Moc użyteczna pobierana przez odbiornik jest równa:

$$P_U = \frac{R}{\pi^2} \cdot \hat{I}^2 \quad (15)$$

Sprawność danego układu prostowania jest równa:

$$\eta = \frac{P_U}{P} = \frac{4}{\pi^2} = 0,406 \quad (16)$$



Rys. 8. Prostownik dwupulsowy: a) schemat elektryczny, b) przebiegi czasowe napięcia i prądu przed prostownikiem, c) przebiegi czasowe napięcia i prądu za prostownikiem

Na rysunku 8a przedstawiono układ do całofalowego prostowania prądu. Jest to tzw. układ Graetza. Dla tego układu prawdziwe są następujące zależności. Wartość średnia prądu przy prostowaniu całofalowym jest równa:

$$\bar{I} = \frac{2}{\pi} \cdot \hat{I} = 0,637 \cdot \hat{I}, \quad (17)$$

natomiast wartość skuteczna prądu jest równa:

$$I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \hat{I} \quad (18)$$

Moc czynna pobierana ze źródła jest równa:

$$P = \frac{R}{2} \cdot \hat{I}^2 \quad (19)$$

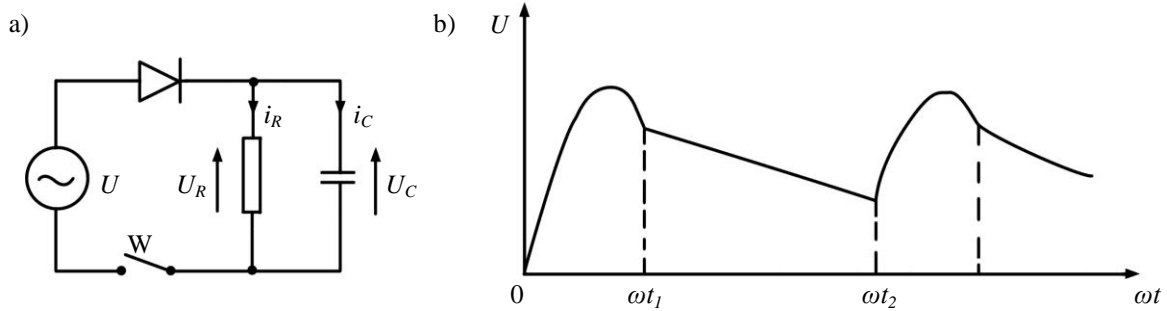
Moc użyteczna pobierana przez odbiornik jest równa:

$$P_U = \frac{4}{\pi^2} \cdot R \hat{I}^2 \quad (20)$$

Sprawność danego układu prostowania jest równa:

$$\eta = \frac{P_U}{P} = \frac{8}{\pi^2} = 0,812 \quad (21)$$

Do wygładzania przebiegu wyprostowanego stosuje się filtry dolnoprzepustowe.



Rys. 9. Prostowanie półfalowe z wygładzaniem: a) schemat elektryczny, b) przebieg czasowy napięcia

Od chwili t_1 trwa proces rozładowania kondensatora o napięciu początkowym:

$$U_C(t_1) = \hat{U} \sin \omega t, \quad (22)$$

poprzez rezystancję R , przy czym prąd rozładowania jest wykładniczą funkcją czasu:

$$i_R = i_C = \frac{\hat{U}}{R} \sin(\omega t_1) \cdot e^{-\left(\frac{t-t_1}{RC}\right)} \quad (23)$$

Temu prądowi odpowiada napięcie na rezystancji:

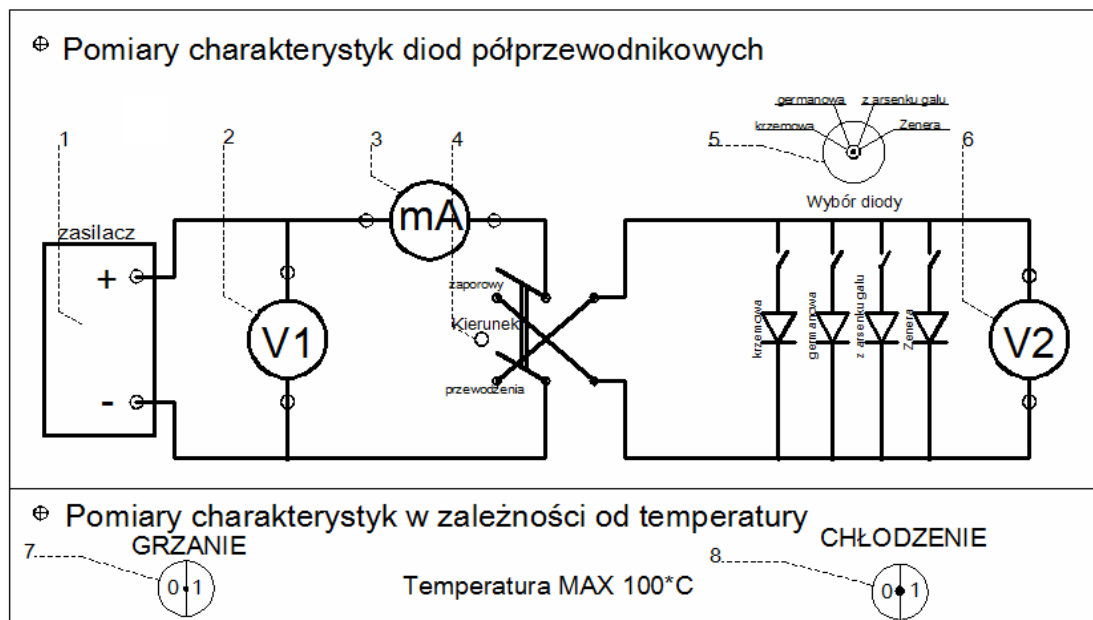
$$U_R = U_C = \hat{U} \omega t_1 \sin(\omega t_1) \cdot e^{-\left(\frac{t-t_1}{RC}\right)} \quad (24)$$

Proces rozładowania będzie trwał do chwili t_2 , w której napięcie na kondensatorze zrówna się z napięciem źródła w kierunku przewodzenia diody.

3. PROGRAM ĆWICZENIA

3.1. Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko *Wyznaczanie wpływu temperatury na parametry diod* to zespół urządzeń do badania wpływu temperatury na diodę **krzemową** i **germanową**. Pomiary będą wykonywane w oparciu o następujący układ:



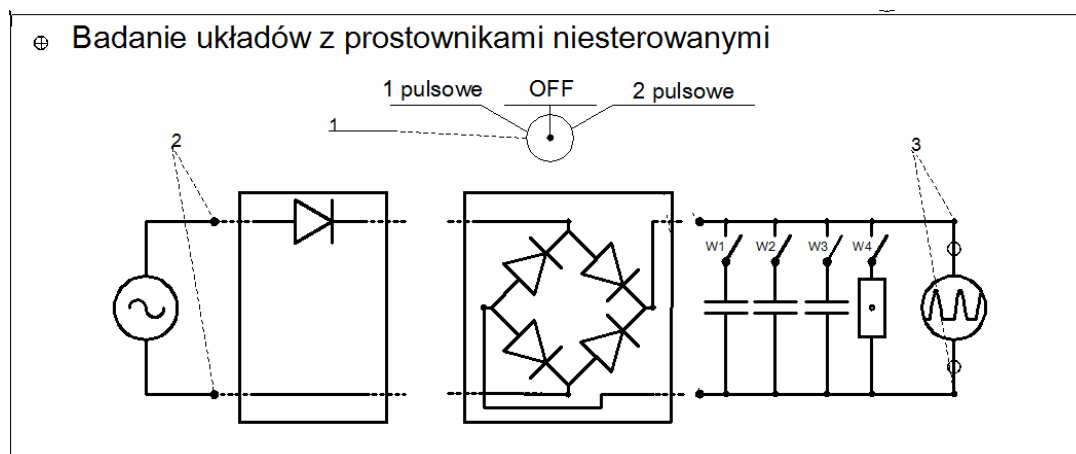
Rys. 10. Widok płyty czołowej stanowiska laboratoryjnego do wyznaczania wpływu temperatury na elementy półprzewodnikowe, z uwzględnieniem przełączników wykorzystywanych podczas pomiarów

Oznaczenia do rysunku 10:

- 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,
- 7 - wyłącznik grzania diod,
- 8 - wyłącznik chłodzenia diod.

Urządzenie składa się z probówki wypełnionej olejem, w którym zanurzone są badane elementy półprzewodnikowe oraz układu pomiarowego. Probówka podgrzewana jest przez grzałkę, istnieje możliwość chłodzenia za pomocą wentylatorów. Pomiar temperatury realizowany jest przez cyfrowy termometr z dołączoną termoparą zanurzoną w oleju razem z próbkami.

Następny segment stanowiska o nazwie *Badanie układów z prostownikami niesterowanymi* umożliwia obserwację na ekranie oscyloskopu przebiegów z układu prostowania półfalowego i całofalowego, bez wygładzenia i z wygładzeniem.



Rys. 11. Widok płyty czołowej stanowiska laboratoryjnego do obserwacji przebiegów z prostowników niesterowanych, z uwzględnieniem przełączników wykorzystywanych podczas pomiarów

Oznaczenia do rysunku 11:

- 1 - przełącznik wyboru danego rodzaju prostownika,
- 2 - miejsce przyłączenia oscyloskopu do obserwacji przebiegu wejściowego,
- 3 - miejsce przyłączenia oscyloskopu do obserwacji przebiegu wyjściowego z filtrami lub bez,
- W1 - włącznik filtra pojemnościowego 10 μF ,
- W2 - włącznik filtra pojemnościowego 100 μF ,
- W3 - włącznik filtra pojemnościowego 1000 μF ,
- W4 - włącznik obciążenia 1 k Ω .

Urządzeniem, na którym obserwujemy charakterystyki jest oscyloskop ustawiony na pomiar w układzie X - Y. Wybór danego rodzaju prostownika sygnalizowany jest zapaleniem się diody przy schemacie przedstawiającym dany układ prostowniczy.

3.2. Wyznaczanie wpływu temperatury na parametry diod półprzewodnikowych

Sposób wykonania ćwiczenia:

- za pomocą przełącznika znajdującego się na przedniej ścianie stanowiska wybrać opcję *Charakterystyki*,
- do gniazd (2), (3), (6) (rysunek 10) podłączyć odpowiednie mierniki,
- podłączyć miernik temperatury,
- do gniazda (1) podłączyć zasilacz laboratoryjny Cobrabid KB 60-01 (kanał A),
- przed włączeniem zasilacza sprawdzić ustawienie potencjometru regulacji napięcia na 0.

Ćw. 14. Wyznaczanie temperaturowych zależności prądu wstecznego diod

- ustawić zakres regulacji napięcia Volts na pozycję 0 (zakres od 0 V do 10 V) oraz ograniczenie prądowe Current limit na 1 A,
- przełącznikiem (4) ustawić zaporowy kierunek pracy diody,
- za pomocą potencjometru zasilacza ustawić wartość 3 V na woltomierzu V2,
- przełącznikiem (5) dokonać wyboru diody do pomiaru (**dioda germanowa lub krzemowa**),
- włącznikiem (7) zasilić grzałkę i uważnie obserwować wskazania miernika temperatury,
- w chwili, gdy **temperatura na mierniku osiągnie wartość 73°C wyłączyć grzałkę** i poczekać aż temperatura osiągnie wartość 100°C,
- odczytać wskazania mikroamperomierza w zakresie temperatur od 100°C do 25°C,
- chłodzenie można włączyć od temperatury 50°C w dół.

Tabela 2. Wyniki pomiarów diod półprzewodnikowych z krzemu i germanu

U_2	Krzem			German		
	t_p °C	$T_p = t_p + 273$ K	I μA	t_p °C	$T_p = t_p + 273$ K	I μA
3V	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			22,5		

3.3. Obserwacja przebiegów wyjściowych z prostowników niesterowanych

Sposób wykonania ćwiczenia:

- za pomocą przełącznika znajdującego się na przedniej ścianie stanowiska wybrać opcję *Prostowniki*,
- podłączyć oscyloskop pod wyjścia które chcemy badać (zastosować następujące ustawienia oscyloskopu: TIME - 5 ms, AMPLITUDA - 5 V, KANAŁ - Y),
- za pomocą przełącznika (1) (rysunek 11) wybrać rodzaj prostownika do przeprowadzenia obserwacji,
- zaobserwować na ekranie oscyloskopu przebiegi z prostowników półfalowych z wygładzaniem i bez wygładzania oraz całofalowych z wygładzaniem i bez wygładzania.

4. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

Na podstawie uzyskanych wyników należy wykreślić charakterystyki zbadanych diod półprzewodnikowych. Z charakterystyk diod należy odczytać napięcia progowe, przy których dana dioda zaczyna przewodzić (punkt przecięcia stycznej do charakterystyki z osią X). Następnie należy wykreślić charakterystyki $\ln(i) = f(1000/T)$ dla badanych próbek. Z wykresu należy wybrać odcinek prostoliniowy o największej stromości (podobnie jak odcinek 1 na rysunku 2) i odczytać wartości i_1 , i_2 oraz $1000/T_1$, $1000/T_2$. Wartości przerwy energetycznej E_G należy obliczyć, korzystając ze wzoru:

$$E_G = \frac{\ln \frac{i_1}{i_2} \cdot 2000k}{\frac{1000}{T_1} - \frac{1000}{T_2}}, \quad (25)$$

gdzie $k = 8,625 \cdot 10^{-5}$ eV/K.

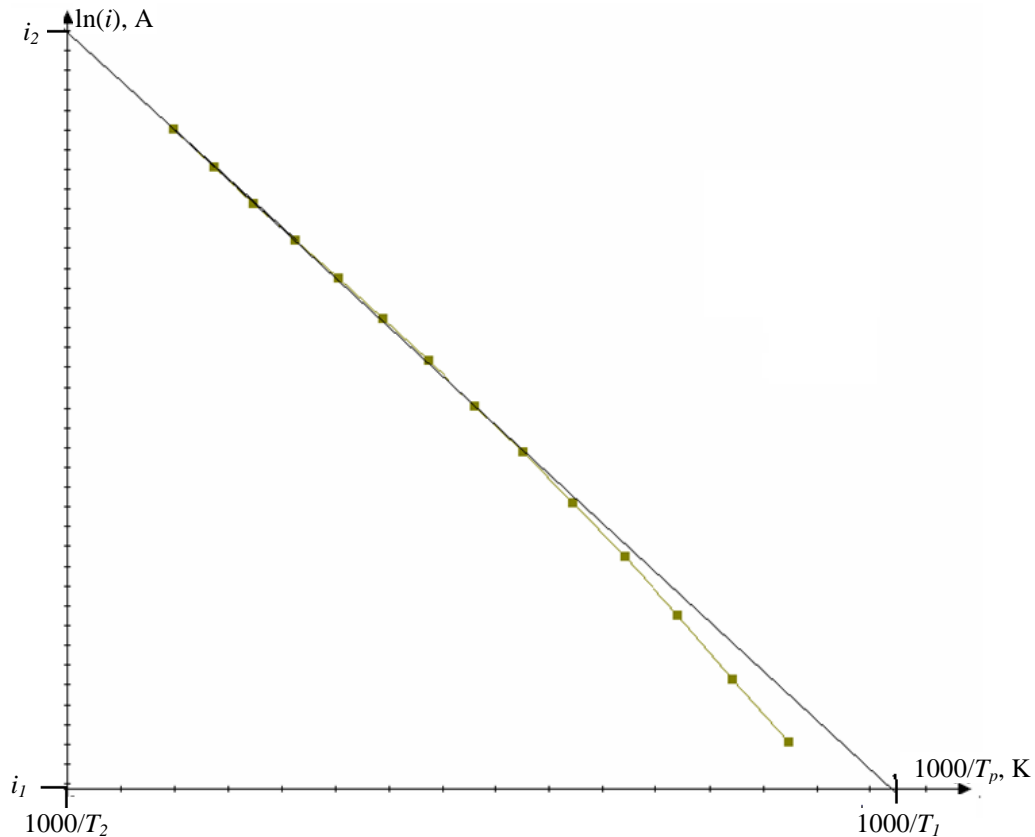
Sposób wyznaczania wartości przerwy E_G :

- wartości temperatury t_p z tabeli 2, podane w °C, przeliczyć na Kelwiny:

$$T_p = (t_p + 273), \text{ K} \quad (26)$$

- wyliczyć wartość $1000/T_p$,
- wartości prądu I przeliczyć na Ampery,
- wykreślić charakterystykę $\ln(i) = f(1000/T_p)$,
- wybrać odcinek o największej stromości i poprowadzić przez niego styczną,
- odczytać z wykresu wartości punktów przecięcia stycznej z osiami (rysunek 12),
- wyliczyć wartości E_G ze wzoru (25),

- wykreślić przebiegi wyjściowe z prostownika półfalowego oraz całofalowego, z wygładzaniem oraz bez wygładzania,
- opracować wnioski z wykonanego ćwiczenia.



Rys. 12. Przykładowy wykres zależności $\ln(i) = f(1000/T_p)$ wraz z wykreśloną styczną, wyznaczającą wartości i_1, i_2 oraz $1000/T_1, 1000/T_2$

5. PYTANIA KONTROLNE

- 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.
- Wpływ temperatury na przewodzenie prądu przez złącze p - n.