

Politechnika Łódzka
Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej

Instrukcja do ćwiczenia

Badanie diod i tyrystorów

Cel ćwiczenia.

Poznanie budowy, zasady działania oraz własności podstawowych elementów półprzewodnikowych.

1. Podstawy teoretyczne.

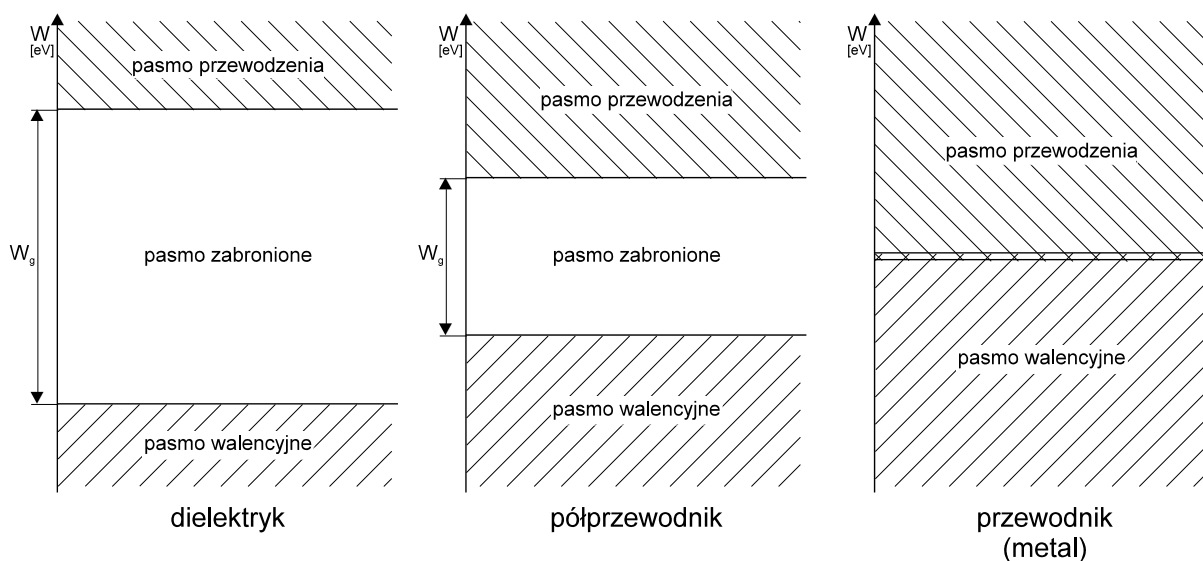
1.1. Materiały stosowane do produkcji diod - półprzewodniki.

Do budowy diod używa się materiałów półprzewodnikowych w postaci monokrystalicznej. Najczęściej wykorzystywany jest krzem (Si) - jeden z najbardziej rozpowszechnionych na Ziemi pierwiastków. Inny półprzewodnik - german (Ge), ze względu na gorsze własności termiczne, jest obecnie stosowany bardzo rzadko. Należy jednak pamiętać, że pierwsze diody półprzewodnikowe były wykonywane właśnie z germanu. W najnowszych rozwiązaniach pojawia się arsenek galu (GaAs), z którego wytwarzane są elementy pracujące w układach wielkiej częstotliwości (np. łączność satelitarna), a także przyrządy optoelektroniczne. Materiały półprzewodnikowe różnią się szerokością pasma zabronionego W_g .

Tabela 1.1

materiał	szerokość pasma zabronionego W_g [eV]
krzem - Si	1,1
german - Ge	0,7
arsenek galu - GaAs	1,4

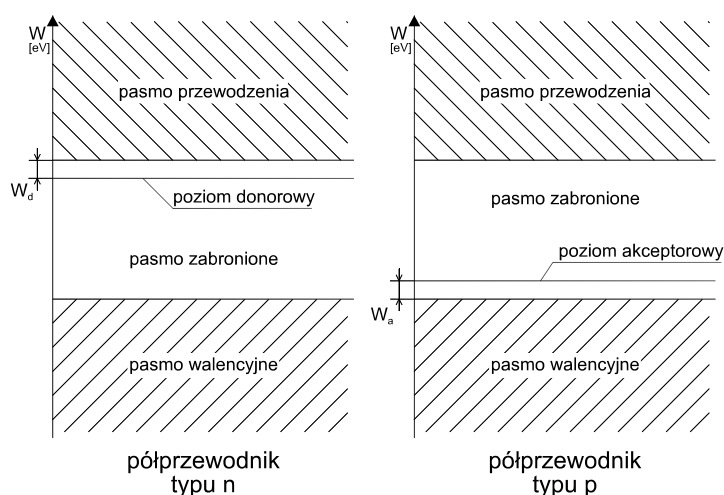
Wielkością pozwalającą na klasyfikację ciał stałych pod względem elektrycznym jest rezystywność ρ (opór właściwy). Przyjmuje się, że półprzewodniki to materiały, których rezystywność w temperaturze pokojowej zawiera się w przedziale $10^{-4} \div 10^7 \Omega\text{m}$. Rezystywność dielektryków jest większa, zaś rezystywność przewodników mniejsza od rezystywności półprzewodników. Zjawisko przewodzenia prądu i zmiany własności elektrycznych półprzewodników najlepiej opisuje model pasmowy ciała stałego.



Rys. 1.1. Modele pasmowe ciał stałych.

Czysty (idealny) kryształ półprzewodnika w temperaturze zera bezwzględnej nie przewodzi prądu, ponieważ wszystkie nośniki ładunku elektrycznego znajdują się w paśmie walencyjnym. Dostarczenie energii (np. cieplnej - ogrzanie, promienistej - oświetlenie) powoduje uwolnienie elektronów z wiązań kowalencyjnych i ich przejście z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Pozostałe po elektronach wolne miejsca w wiązaniach nazywane są dziurami. Opisany proces to **generacja par elektron - dziura**. Elektrony posiadają, jak wiadomo, ładunek elektryczny ujemny, dziury muszą mieć więc ładunek dodatni. Pojawienie się swobodnych ładunków, przy obecności pola elektrycznego, stwarza możliwość przepływu prądu elektrycznego - rezystywność półprzewodnika maleje. Proces odwrotny do generacji, polegający na neutralizacji różnoimiennych ładunków (połączenie elektronu z dziurą), nazywa się **rekombinacją**. Procesowi temu towarzyszy oddawanie energii. Jeżeli w przewodzeniu prądu w półprzewodniku biorą udział nośniki powstałe w wyniku generacji par elektron-dziura to zjawisko takie nazywa się **przewodnictwem samoistnym**, a półprzewodniki (bez zanieczyszczeń, domieszek), w których płynie taki prąd to **półprzewodniki samoistne**.

Do budowy diod potrzebne są jednak **półprzewodniki domieszkowane** czyli półprzewodniki z celowo wprowadzonymi atomami innych pierwiastków w ilości $10^8 - 10^{21}$ atomów/m³. W zależności od wartościowości domieszki względem wartościowości materiału półprzewodnika wyróżnia się półprzewodniki domieszkowane typu n i typu p. W **półprzewodnikach typu n** (negative) występuje nadmiar elektronów. Jest to efekt wprowadzenia atomów o wartościowości większej od wartościowości półprzewodnika (domieszki donorowe). Np. krzem lub german (pierwiastki czterowartościowe) domieszkuje się pierwiastkami pięciowartościowymi - fosforem lub rzadziej arsenem czy antymonem. Cztery z elektronów walencyjnych domieszki tworzą wiązania z elektronami walencyjnymi materiału podstawowego. Pozostały - piąty elektron jest związany z atomem tylko siłami przyciągania i do jego uwolnienia, czyli przejścia do pasma przewodzenia, potrzebna jest znacznie mniejsza energia (energia W_d) niż do rozerwania wiązań kowalencyjnych - patrz rys. 1.2.

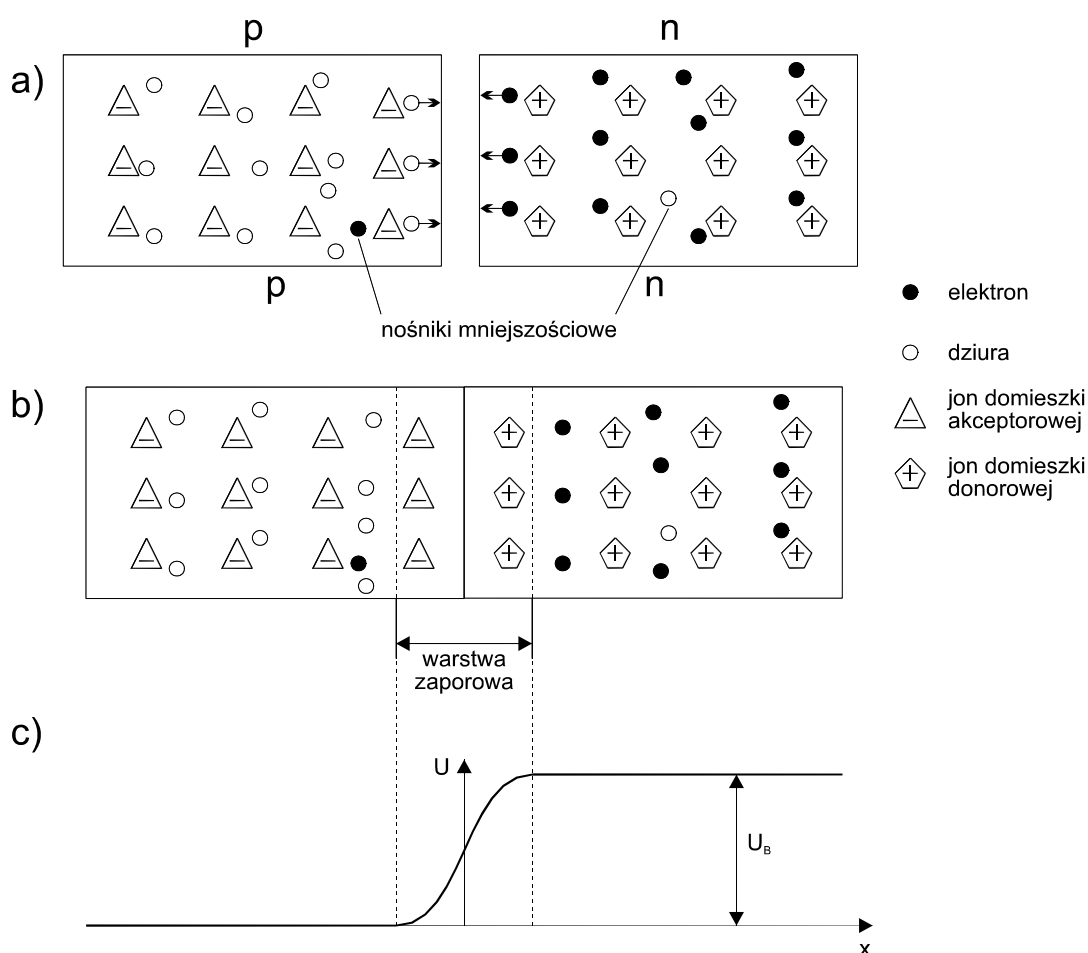


Rys. 1.2. Modele pasmowe półprzewodników domieszkowanych.

Półprzewodniki typu p (positive) uzyskuje się w wyniku domieszkowania atomami pierwiastka o wartościowości mniejszej od wartościowości półprzewodnika (domieszki akceptorowe). Dla krzemu i germanu takimi domieszkami są pierwiastki trójwartościowe, np. bor, rzadziej aluminium lub gal. Efektem takiego procesu jest niedomiar elektronów. Atomy domieszki są zjonizowane, a tam gdzie brakuje elektronu istnieje ładunek dodatni zwany dziurą. W półprzewodnikach typu n nośnikami większościowymi są więc elektrony, zaś w półprzewodnikach typu p - dziury.

1.2. Złącze p-n.

Półprzewodnik, w którym wytworzono dwa obszary o odmiennych typach przewodnictwa, rozdzielone powierzchnią kontaktową, przedstawia sobą tzw. **złącze p-n**. Jest to podstawowy element większości przyrządów półprzewodnikowych m.in. diod, tyrystorów, tranzystorów. Złącze otrzymuje się np. w procesie dyfuzji lub stapiania dwóch warstw półprzewodników typu n i p. Ze względu na różną koncentrację nośników w obu obszarach - patrz rys. 1.3 - elektrony z obszaru n dyfundują do obszaru p, zaś dziury w kierunku przeciwnym.



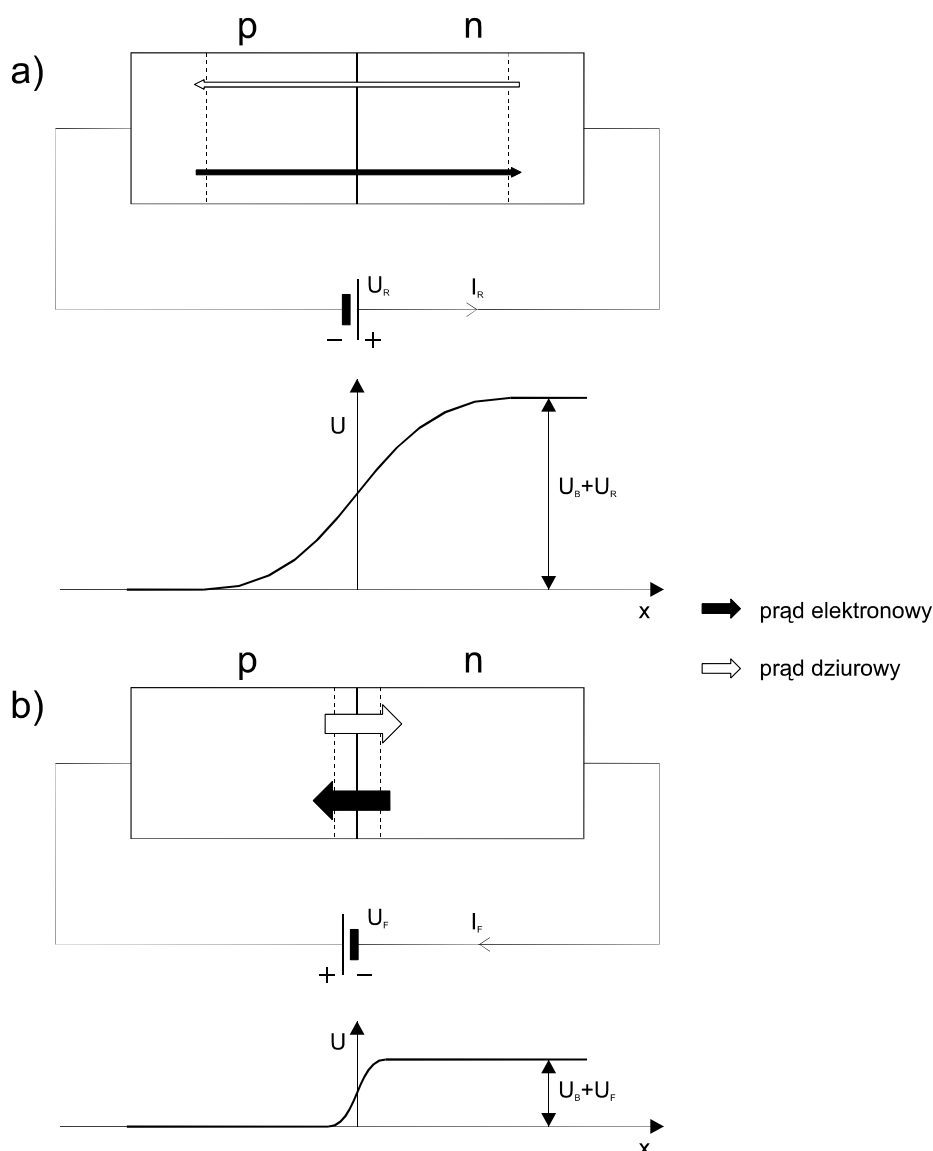
Rys. 1.3. Zjawiska zachodzące w złączu p-n: a) przed „połączeniem”; b) po „połączeniu”; c) rozkład potencjału w złączu.

Po przejściu przez złącze nośniki ulegają rekombinacji, zaś w ich miejsce dyfundują nowe. W strefie przygranicznej zaczyna więc brakować swobodnych nośników - elektronów w warstwie n i dziur w warstwie p. Istnieją tu natomiast nieruchome, zjonizowane atomy domieszek, posiadające określony ładunek elektryczny, w warstwie n - dodatni, w warstwie p - ujemny. Taki obszar ładunków nazywa się **warstwą zaporową**. Pole elektryczne w warstwie, reprezentowane przez **barierę potencjału** U_B - patrz rys. 1.3, hamuje dalszy ruch nośników. Wartość U_B zależy od rodzaju półprzewodnika i wynosi np. dla Si $\sim 0,7V$, dla Ge $\sim 0,3V$.

Szerokość warstwy zaporowej oraz wartość bariery potencjału zmieniają się pod wpływem napięcia zewnętrznego. Jeżeli biegun dodatni źródła napięcia podłączymy do warstwy n, zaś ujemny do warstwy p to wartość bariery potencjału zwiększa się o wartość przyłożonego napięcia, a warstwa zaporowa poszerza się. Przez złącze płynie wtedy bardzo mały prąd - prąd nośników mniejszościowych, generowanych termicznie. Jest to **polaryzacja złącza**

p-n w kierunku zaporowym. Tak spolaryzowane złącze jest w **stanie zaporowym** a jego rezystancja jest bardzo duża.

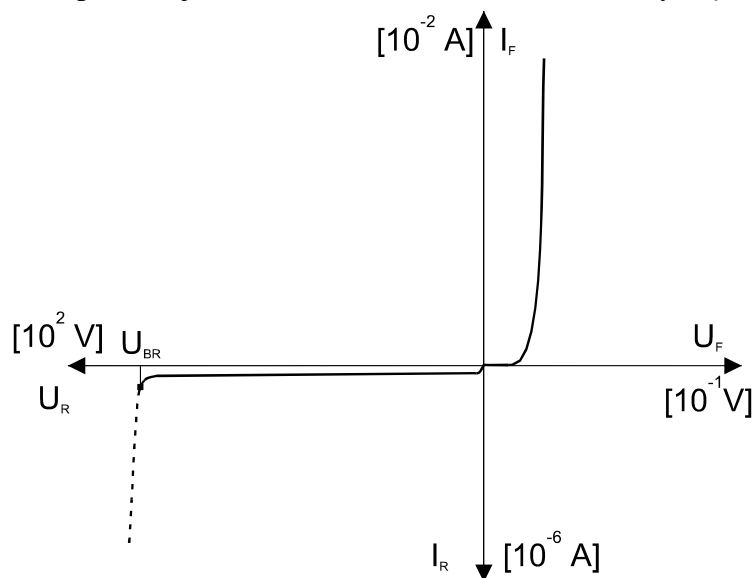
Jeżeli biegun dodatni źródła napięcia przyłączymy do warstwy p, a biegun ujemny do warstwy n to wartość bariery potencjału zmniejsza się o wartość przyłożonego napięcia, zmniejsza się również szerokość warstwy zaporowej. Rośnie więc prawdopodobieństwo przejścia nośników większościowych. Przez złącze płynie prąd dyfuzyjny, tym większy im mniejsza jest wartość bariery potencjału. Jest to **polaryzacja złącza p-n w kierunku przewodzenia**. W tym przypadku rezystancja złącza jest bardzo mała – złącze jest w **stanie przewodzenia**.



Rys. 1.4. Polaryzacja złącza p-n: a) w kierunku zaporowym; b) w kierunku przewodzenia.

Analizę zachowania złącza ułatwia tzw. **charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p-n**. Polaryzacji w kierunku przewodzenia odpowiada część charakterystyki znajdująca się w pierwszej ćwiartce układu współrzędnych. Rezystancja złącza maleje ze wzrostem przyłożonego napięcia, przy czym zauważalny spadek ma miejsce po przekroczeniu pewnej wartości napięcia (bariery potencjału). Charakterystyka staje się prawie pionowa, wartość rezystancji wynosi od kilku do kilkudziesięciu Ω . W trzeciej ćwiartce układu współrzędnych znajduje się część charakterystyki odpowiadająca polaryzacji w kierunku zaporowym. Rezystancja złącza

jest wtedy bardzo duża (dla Ge $\sim 10^6 \Omega$, Si $\sim 10^{10} \Omega$) i praktycznie nie zmienia się przy wzroście napięcia – charakterystyka jest prawie pozioma. Przyłożenie napięcia większego od tzw. napięcia przebicia U_{BR} powoduje nieodwracalne zniszczenie struktury złącza – **przebicie**.



Rys. 1.5. Charakterystyka prądowo-napięciowa złącza p-n.

1.3. Elementy półprzewodnikowe.

Charakterystyczne własności złącza p-n pozwoliły na skonstruowanie szeregu elementów półprzewodnikowych, takich jak diody, tyrystory czy tranzystory.

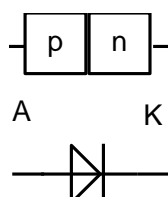
1.3.1. Diody.

Nazwa dioda określa element dwuzaciskowy, jednozłączowy. Ze względu na zastosowanie diody można podzielić na:

- diody prostownicze;
- diody Zenera;
- diody impulsowe (przełączające);
- diody pojemnościowe;
- diody detekcyjne;
- diody elektroluminescencyjne;
- fotodiody;
- diody laserowe;
- diody mikrofalowe (diody Schotky'ego, tunelowe).

Najpowszechniej stosowane są diody prostownicze, Zenera, impulsowe oraz elektroluminescencyjne.

1.3.1.1. Diody prostownicze.



Rys. 1.6. Struktura i symbol graficzny diody prostowniczej i impulsowej (A – anoda, K – katoda).

Diody prostownicze są to diody służące do przekształcania prądu zmiennego o stosunkowo niewielkiej częstotliwości (najczęściej 50 Hz) na prąd jednokierunkowy. Wykorzystana jest tu, opisana wcześniej, własność złącza p-n polegająca na przewodzeniu prądu tylko w jednym kierunku, przy polaryzacji w kierunku przewodzenia. Jest to cecha wszystkich diod, nie tylko prostowniczych. Jednak określone parametry (szczytowe napięcie wsteczne $U_{RSM} \sim 50 \div 1000V$, znaczny prąd znamionowy I_{FN} do kilku A), otrzymywane poprzez odpowiednie modyfikowanie złącza p-n, predestynują diody prostownicze do takich zastosowań.

1.3.1.2. Diody impulsowe.

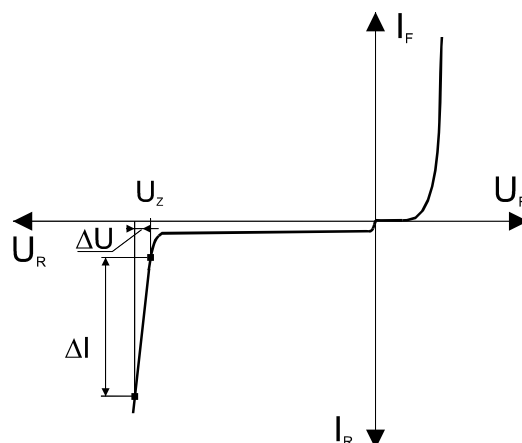
Zadaniem diod impulsowych jest włączanie i wyłączanie obwodów elektronicznych poprzez odpowiednią polaryzację napięciową. Dioda pracuje tu jako klucz. Krytycznym parametrem takich diod jest szybkość przełączania, czyli szybkość przejścia ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego.

1.3.1.3. Diody Zenera.



Rys. 1.7. Symbol graficzny diody Zenera.

Diody Zenera są to diody o specjalnie zmodyfikowanej charakterystyce wstecznej. Przy określonej wartości napięcia wstecznego zwanego napięciem Zenera U_Z , dioda Zenera wchodzi w stan przebicia. W przeciwieństwie do innych diod stan ten może osiągać wielokrotnie. W obszarze przebicia charakterystyka staje się bardzo stroma – dioda Zenera ma wtedy bardzo małą rezystancję dynamiczną. Własność ta znalazła zastosowanie m. in. w stabilizatorach napięcia utrzymujących stałe napięcie wyjściowe niezależnie od wahań napięcia wejściowego, układach ograniczników napięć. Najważniejszym parametrem diod Zenera jest napięcie przebicia U_Z . Obecnie produkowane są diody na napięcie od 1V do kilkuset V. O jakości diody decyduje rezystancja dynamiczna w stanie przebicia $R_{dz} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$. Im rezystancja R_{dz} jest mniejsza tym dioda Zenera jest lepsza. Maksymalny prąd wsteczny, jaki może płynąć przez diodę Zenera, jest ograniczony poprzez wartość mocy dopuszczalnej $P_{max}; I_{max} = \frac{P_{max}}{U_Z}$.

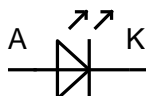


Rys. 1.8. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody Zenera.

W zależności od sposobu domieszkowania (koncentracji domieszek w złączu p-n) diody Zenera można podzielić na:

- diody ze złączem silnie domieszkowanym, w których występuje przebiecie Zenera;
- diody ze złączem słabo domieszkowanym, w których występuje przebiecie lawinowe;
- diody ze złączem o średniej koncentracji domieszek, w których występują oba zjawiska.

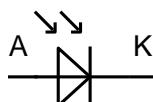
1.3.1.4. Diody elektroluminescencyjne.



Rys. 1.9. Symbol graficzny diody elektroluminescencyjnej.

W diodach elektroluminescencyjnych, nazywanych także LED (Light Emitting Diode), wykorzystywane jest zjawisko emisji promieniowania przez złącze p-n spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Prąd przepływający przez złącze powoduje rekombinację nośników większościowych. Zjawisku temu towarzyszy emisja fotonów, czyli fali elektromagnetycznej o długości λ zależnej od rodzaju użytego półprzewodnika. Diody LED wykonane są ze związków galu (GaAs, GaP, GaAsP, GaN). Emitują najczęściej światło czerwone ($\lambda=650\div700$ nm), pomarańczowe ($\lambda=620$ nm), żółte ($\lambda=580$ nm), zielone ($\lambda=560$ nm), niebieskie ($\lambda\sim450$ nm), białe a także promieniowanie podczerwone ($\lambda=800\div1000$ nm) i ultrafioletowe ($\lambda\sim400$ nm). Diody elektroluminescencyjne są stosowane do sygnalizacji (pojedyncze diody), wizualizacji informacji (wyświetlacze, matryce) oraz do przesyłania informacji bezprzewodowo (nadajniki podczerwieni). Diody LED najnowszej generacji charakteryzują wysoką skutecznością świetlną i trwałością nieporównywalnie większą od tradycyjnych źródeł światła. Dzięki swoim korzystnym cechom diody LED praktycznie wyparły w układach oświetleniowych żarówki i świetlówki. Spadek napięcia na przewodzącej diodzie LED wynosi od 1,5 do 3,5V.

1.3.1.4. Fotodiody.

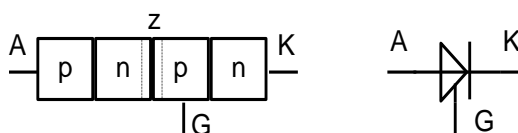


Rys. 1.10. Symbol graficzny fotodiody.

Fotodiody można zaliczyć do tzw. detektorów promieniowania. Są to diody pracujące normalnie w stanie zaporowym. Prąd wsteczny fotodiody, zależy od natężenia oświetlenia padającego na odsłonięte złącze p-n. Wykorzystywane jest tu tzw. zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne polegające na generacji swobodnych nośników dzięki absorbowaniu energii promieniowania zewnętrznego (fotonów). Fotodiody najczęściej współpracują z diodami LED tworząc tzw. łącza optoelektroniczne lub bariery optyczne (fotokomórki).

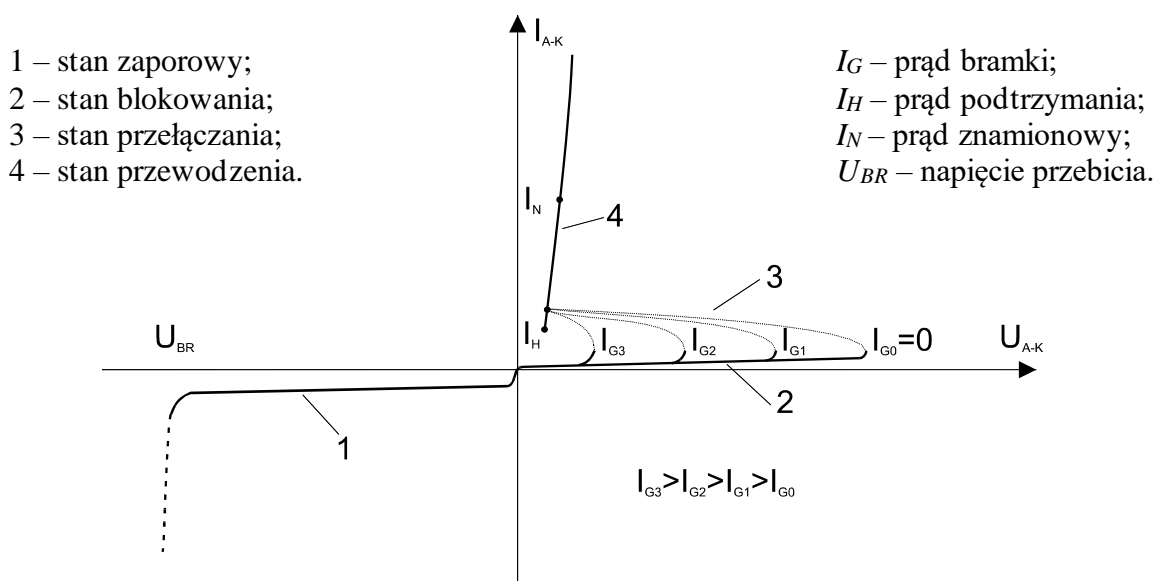
1.3.2. Tyrystory.

Tyrystor jest czterowarstwowym elementem półprzewodnikowym o trzech wyprowadzeniach.



Rys. 1.11. Struktura wewnętrzna i symbol graficzny tyrystora
(A – anoda, K – katoda, G – bramka, z – warstwa zaporowa).

Zewnętrznie tyrystor różni się od diody posiadaniem dodatkowej elektrody nazywanej bramką. Bramka służy do kontrolowanego włączania tyrystora, stąd tyrystor nazywany jest czasem diodą sterowaną. Na charakterystyce prądowo-napięciowej tyrystora można wyróżnić trzy stabilne stany pracy oraz jeden niestabilny. Stany stabilne to stan zaporowy, stan przewodzenia, analogiczne z podobnymi stanami diody prostowniczej oraz stan blokowania.



Rys. 1.12. Charakterystyka prądowo-napięciowa tyrystora .

Podczas stanu blokowania tyrystor nie przewodzi prądu, pomimo odpowiedniej polaryzacji (anoda połączona z + źródła zasilania, katoda z -). Zewnętrzne złącza p-n są spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Jednak złącze środkowe jest spolaryzowane w kierunku zaporowym i w jego obszarze przygranicznym istnieje warstwa zaporowa **z** (bariera potencjału). Aby wprowadzić tyrystor w stan przewodzenia (włączyć) należy zlikwidować wewnętrzną barierę potencjału. Można wymienić następujące sposoby włączania tyrystorów:

- impulsem bramkowym - krótkotrwałe przepuszczenie prądu przez obwód bramka-katoda (dostarczenie odpowiedniej porcji ładunku do warstwy zaporowej); jest to podstawowy sposób włączania tyrystorów;
- przez dostarczenie energii (cieplnej, promienistej) do warstwy zaporowej, powodujące zwiększenie liczby nośników mniejszościowych w złączu środkowym;
- przez przekroczenie granicznej wartości napięcia blokowania (przy prądzie bramki $I_G=0$), powodujące lawinowe zwiększanie liczby nośników mniejszościowych w warstwie **z**;
- przez przekroczenie granicznej szybkości narastania napięcia $U_{A-K} \frac{dU_{A-K}}{dt}$.

Jedynym sposobem wyłączenia przewodzącego tyrystora jest zmniejszenie prądu I_{A-K} poniżej wartości I_H (prądu podtrzymania). Realizuje się to praktycznie zmniejszając napięcie U_{A-K} do zera, lub zmieniając jego polaryzację.

Podstawowymi parametrami tyrystora są znamionowy prąd przewodzenia (dla tyrystorów małej mocy od 1 do 20A) oraz maksymalne napięcie wsteczne U_{BRM} (od 50 do 1000 V).

Ze względu na swoje możliwości tyrystory znalazły zastosowanie w układach sterujących dużej mocy (np. sterowanie prędkością obrotową silników).

Do wad tyrystorów należy zaliczyć:

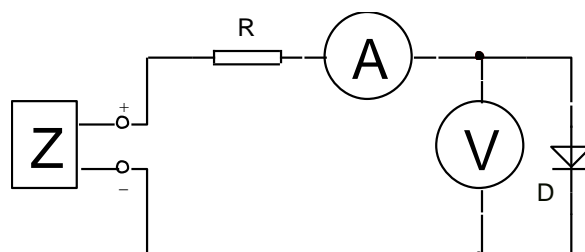
- brak możliwości kontrolowanego wyłączania (wady tej nie mają specjalne tyrystory wyłączalne tzw. GTO);
- możliwość przewodzenia prądu tylko w jednym kierunku (istnieją tzw. tyrystory symetryczne - triaki, które można włączać przy dodatnim i ujemnym napięciu U_{A-K}).

2. Badania laboratoryjne.

2.1. Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej.

2.1.1. Polaryzacja w kierunku przewodzenia.

Układ połączeń.



Z – zasilacz regulowany;
R – opornik ograniczający prąd;
D – badana dioda prostownicza;
A – miliamperomierz;
V- woltomierz.

Przebieg pomiarów.

Połączyć układ wg powyższego schematu. Zmierzyć prąd płynący przez diodę dla kilku wartości napięć podanych w instrukcji dodatkowej. Po zakończeniu pomiarów dotknąć korpus diody i zaobserwować wpływ ogrzewania na prąd przewodzenia przy stałej wartości napięcia. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli:

Tabela 2.1

U_F	I_F
[V]	[mA]

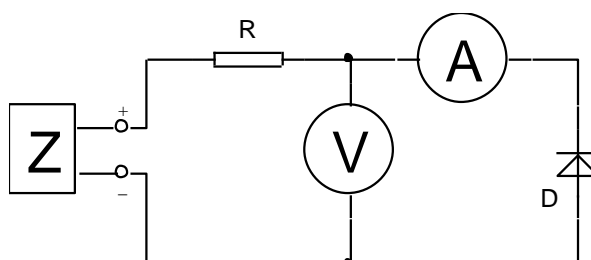
Na podstawie pomiarów narysować charakterystykę prądowo-napięciową $I_F=f(U_F)$. Policzyć rezystancję dynamiczną diody R_{dF} dla prostoliniowego odcinka charakterystyki (stan przewodzenia):

$$R_{dF} = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}.$$

Wykonać pomiary dla dwóch diod (w tym jednej diody świecącej) wskazanych przez prowadzącego ćwiczenie.

2.1.2. Polaryzacja w kierunku zaporowym.

Układ połączeń.



Z – zasilacz regulowany;
R – opornik ograniczający prąd;
D – badana dioda prostownicza;
A – mikroamperomierz;
V – woltomierz.

Przebieg pomiarów.

Połączyć układ wg powyższego schematu. Zmierzyć prąd płynący przez diodę dla kilku wartości napięć podanych w instrukcji dodatkowej. Po zakończeniu pomiarów dotknąć korpus diody i zaobserwować wpływ ogrzewania na prąd wsteczny przy stałej wartości napięcia. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli:

Tabela 2.2

U_R	I_R
[V]	[μ A]

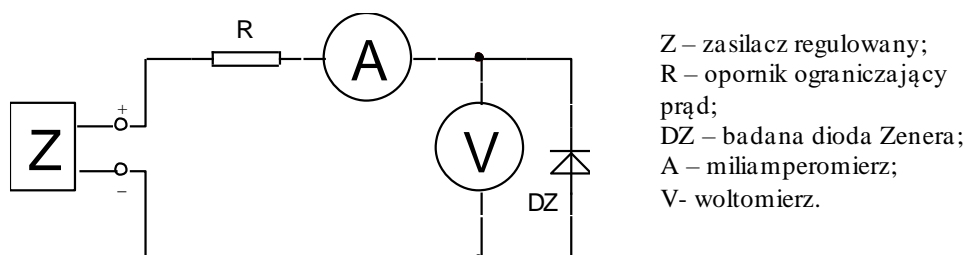
Na podstawie pomiarów narysować charakterystykę prądowo-napięciową $I_R=f(U_R)$ (trzecia ćwiartka układu współrzędnych). Policzyc rezystancję dynamiczną diody R_{dR} dla prostoliniowego odcinka charakterystyki (stan zaporowy):

$$R_{dR} = \frac{\Delta U_R}{\Delta I_R}.$$

Wykonać pomiary dla dwóch diod (Si i Ge) wskazanych przez prowadzącego ćwiczenie.

2.2. Wyznaczanie charakterystyki prądowo napięciowej diody Zenera spolaryzowanej w kierunku zaporowym.

Układ połączeń.



Przebieg pomiarów.

Połączyć układ wg powyższego schematu. Zmierzyć prąd płynący przez diodę dla kilku wartości napięć podanych w instrukcji dodatkowej. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli:

Tabela 2.3

U_Z	I_Z
[V]	[mA]

Na podstawie pomiarów narysować charakterystykę prądowo-napięciową $I_Z=f(U_Z)$ (trzecia ćwiartka układu współrzędnych). Obliczyć rezystancję dynamiczną diody R_{dZ} dla prostoliniowego odcinka charakterystyki (stan przebicia):

$$R_{dZ} = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}.$$

2.3. Wyznaczanie napięcia progowego dla diod świecących.

Przebieg pomiarów.

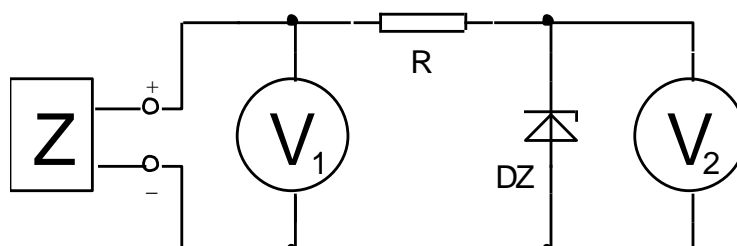
Połączyć układ wg schematu z punktu 2.1.1 (polaryzacja w kierunku przewodzenia). Zwiększając stopniowo napięcie podawane na diodę świecącą zaobserwować wartość napięcia U_p , przy którym dioda zaczyna świecić. Powtórzyć badania dla pozostałych diod świecących wskazanych przez prowadzącego ćwiczenie. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli:

Tabela 2.4

Dioda LED	U_p
	[V]

2.4. Badanie stabilizatora napięcia.

Układ połączeń.



Przebieg pomiarów.

Połączyć układ wg powyższego schematu. Ustawić określoną wartość napięcia wejściowego (woltomierz V_1) i zmierzyć napięcie wyjściowe (woltomierz V_2). Pomiarów dokonać dla kilku wartości napięć wejściowych, w tym kilku $< U_Z$ i kilku $> U_Z$. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli:

Tabela 2.5

U_{we}	U_{wy}
[V]	[V]

Na podstawie wyników pomiarów narysować charakterystykę przejściową stabilizatora $U_{wy}=f(U_{we})$. Obliczyć współczynnik stabilizacji dla obszaru stabilizacji (napięcie wejściowe $U_{we}>U_Z$) $k_s=\frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we}}$.

3. Przykładowe pytania kontrolne.

1. Wyjaśnić pojęcia: półprzewodnik samoistny i domieszkowany.
2. Wyjaśnić mechanizm przepływu prądu przez półprzewodnik samoistny i domieszkowany.
3. Wyjaśnić zjawiska zachodzące w złączu p-n.
4. Charakterystyki prądowo-napięciowe elementów półprzewodnikowych.
5. Omówić rodzaje diod.
6. Wyjaśnić działanie tyrystora.