

ĆWICZENIE 1

Podstawowe elementy elektroniczne – diody

1.1. Wstęp – przygotowanie do zajęć

Statyczne parametry diod półprzewodnikowych

W elementach półprzewodnikowych (w tym w diodach) występują różne typy złącz, będące na poziomie atomowym granicą dwóch obszarów w kryształach ciała stałego różniących się koncentracją domieszek. W elektronice są stosowane złącza półprzewodnik-półprzewodnik, a najczęściej złącza dwóch półprzewodników o różnym typie przewodnictwa (złącza P oraz N).

Złącze **p-n** powstaje na styku warstwy półprzewodnika typu **P**, dla którego nośnikami większościowymi są dziury i półprzewodnika typu **N**, gdzie nośnikami większościowymi są swobodne elektrony. W obszarach **P** i **N** w obszarze złącza pojawia się różnica koncentracji nośników ładunków (swobodne elektrony, dziury), która powoduje ich przemieszczanie (dyfuzję). Swobodne elektrony z obszaru **N**, które są w pobliżu złącza dyfundują do obszaru **P**, a dziury z obszaru **P**, które są w pobliżu złącza dyfundują do obszaru **N**. Nośniki przedostające się przez złącze do przeciwnych obszarów stają się nośnikami mniejszościowymi w tych obszarach i rekombinują z nośnikami większościowymi. W wyniku tego procesu w obszarze złącza po stronie półprzewodnika typu **N** powstaje strefa dodatnio naładowana, którą tworzą jony domieszki, zwanej donorową, a po stronie półprzewodnika typu **P** powstaje strefa ujemnie naładowana, którą tworzą jony domieszki, zwanej akceptorową. W obszarze złącza powstaje podwójna warstwa nieskompensowanych ładunków, nosząca nazwę **warstwy zaporowej, obszaru zubożonego lub ładunku przestrzennego**. W warstwie tej brak jest nośników większościowych. Po utworzeniu warstwy zaporowej przepływ nośników większościowych przez złącze zostaje zahamowany, ładunek przestrzenny dodatni po stronie N hamuje przepływ dziur z obszaru P do N, a ładunek przestrzenny ujemny po stronie P hamuje przepływ elektronów z obszaru N do P. Powstaje pole elektryczne reprezentowane przez barierę potencjału, nazywane polem dyfuzyjnym (E_{diff})¹.

Dioda półprzewodnikowa jest przyrządem półprzewodnikowym z jednym złączem **p-n** i dwoma wyprowadzeniami. Strukturę złącza i **prądowo-napięciową $I=f(V)$** rzeczywistej diody dla różnych kierunków prądów i napięć przedstawiono na Rys. 1.1. Warto tutaj podkreślić, iż pokazana grafika ma charakter poglądowy niektóre zjawiska są tutaj celowo przejaskrawione; należy zwrócić szczególną uwagę na wartości i jednostki na osiach charakterystyki. W przypadku braku napięcia na złączu **p-n** ($V = 0$), złącze jest w stanie równowagi Boltzmann, liczba unoszonych nośników mniejszościowych jest równa liczbie dyfundujących (dyfuzja) nośników większościowych. Prąd wynikowy jest równy zero ($I = 0$). Przyłożenie zewnętrznego napięcia do złącza zakłóca stan równowagi.

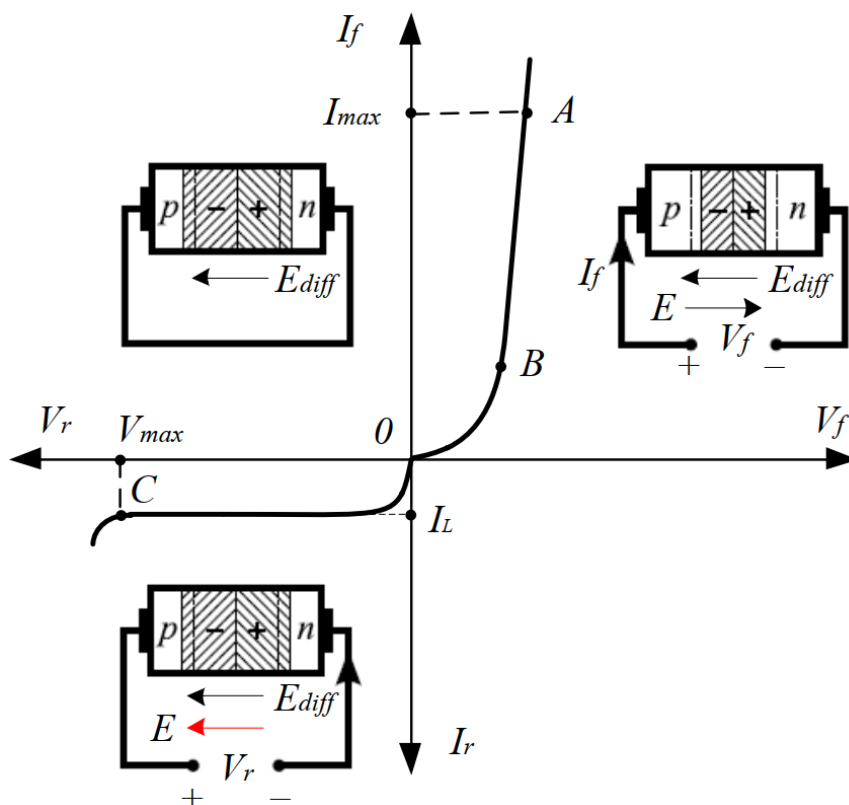
Założmy, że do złącza diody przyłożone jest zewnętrzne napięcie w taki sposób, że natężenie pola elektrycznego E odpowiada kierunkowi pola dyfuzyjnego E_{diff} , wypadkowe natężenie pola na złączu **p-n** zwiększa się. Następuje dalszy odpływ swobodnych nośników z obszaru otaczającego warstwę zaporową, a jej szerokość się zwiększa (nośniki mniejszościowe są „przeciągane” przez pole elektryczne przez złącze p-n do sąsiedniego obszaru, następuje tzw. „ekstrakcja”). Zwiększona bariera potencjału nie stanowi przeszkody dla przepływu prądu wstecznego I_r , który przepływa przez złącze **p-n**. Ładunki mniejszościowe z jednego obszaru dryfują dzięki polu elektrycznemu do drugiego obszaru, gdzie stają się ładunkami większościowymi. Ponieważ koncentracja nośników większościowych jest znacznie wyższa niż koncentracja nośników mniejszościowych, pojawienie się niewielkiej liczby dodatkowych nośników większościowych praktycznie nie wpływa na stan równowagi złącza. W związku z tym prąd wsteczny zależy tylko od liczby nośników mniejszościowych, które pojawiają się na granicy złącza. Przykładane napięcie zewnętrzne określa prędkość przenoszenia się nośników z jednego

¹ M. P. Kaźmierkowski, J. Matysik, „Wprowadzenie do elektroniki i energoelektroniki”, OWPW 2005
A. Chwaleba, B. Moeschke, G. Płoszajski, „Elektronika”, WSiP 1999

obszaru złącza do drugiego, ale nie określa liczby nośników przechodzących przez złącze w jednostce czasu. W związku z tym prąd wsteczny w złączu reprezentuje prąd, który nie zależy od potencjału złącza, tj. pozostaje stały przy zmianach napięcia wstecznego złącza. Stąd też stałość charakterystyki prądowo-napięciowej $I=f(V)$ diody dla napięć i prądów wstecznych (III ćwiartka wykresu przedstawionego na Rys. 1.1). **Prąd wsteczny** nazywa się czasem **prądem nasycenia** i jest oznaczany I_0 . Typowe wartości tego prądu są w zakresie od 10^{-12} do 10^{-6} A.

Jeżeli do diody przyłożone jest zewnętrzne napięcie w taki sposób, że biegun dodatni źródła zasilania podłączony do obszaru P, biegun ujemny do obszaru N to wytworzone w obszarze złącza pole elektryczne E jest przeciwnie skierowane do kierunku pola dyfuzyjnego E_{diff} , a złącze jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, co oznacza, że bariera potencjału na złączu p-n zmniejszy się ($E_{diff} - E$). Szerokość warstwy zaporowej (obszar ładunku przestrzennego) także zmniejszy się. Zmniejszenie bariery potencjału powoduje wzrost prądu dyfuzyjnego, czyli wzrost liczby dziur przechodzących z obszaru P do N i elektronów przechodzących z obszaru N do obszaru P. Przez złącze p-n przepływa stosunkowo duży **prąd przewodzenia** I_f . w tym wypadku napięcie na diodzie jest określane jako napięcie przewodzenia V_f (*ang. forward voltage*). Nośniki ładunku, które przechodzą przez złącze pojawiają się w sąsiednim obszarze jako nadmiarowe nośniki mniejszościowe.

Charakterystykę prądowo-napięciową $I=f(V)$ diody, przedstawiono na Rys. 1.1.



Rys. 1.1. Charakterystyka prądowo-napięciowa $I=f(V)$ rzeczywistej diody półprzewodnikowej

Jednym z parametrów opisujących właściwości diody jest rezystancja dynamiczna diody, którą wyznaczyć można na podstawie znajomości nachylenia charakterystyki $I=f(V)$. W pierwszej ćwiartce układu współrzędnych, charakterystyka prądowo-napięciowa diody ma kształt funkcji wykładniczej. Badając przyrosty dV_f i dI_f w dowolnym punkcie tej charakterystyki znajdującym się pomiędzy punktami A i B można stwierdzić, że w tej części wykresu występują niewielkie zmiany napięcia dV_f przy znacznej zmianie prądu dI_f (należy pamiętać że charakterystyk jest celowo przejawskrawiona, a w rzeczywistości

charakterystyka w kierunku przewodzenia jest bardzo stroma tj. dużym zmianom prądu odpowiadają niewielkie zmiany napięcia). Oznacza to, że rezystancja dynamiczna diody na tym odcinku charakterystyki jest niewielka. W tym wypadku dioda jest w stanie przewodzenia, a prąd przewodzenia I_f jest ograniczony tylko przez elementy układu, w którym jest umieszczona dioda i nie powinien on przekroczyć maksymalnej dopuszczalnej wartości I_{max} , powyżej której struktura złącza ulegnie termicznemu uszkodzeniu.

Dla część charakterystyki od punktu **B** do początku układu współrzędnych rezystancja dynamiczna diody zmienia się i gwałtownie rośnie, gdy punkt pracy zbliża się do początku układu współrzędnych. Ta część charakterystyki nie jest brana pod uwagę, jeżeli dioda jest elementem prostownika, a wartości prądów i napięć w układzie są relatywnie duże.

Dla część charakterystyki od początku układu współrzędnych do punktu **C** rezystancja dynamiczna diody jest bardzo duża, bo dużym zmianom napięcia dV_r , odpowiadają bardzo małe zmiany prądu wstecznego diody dI_r (przypomnijmy iż wartości prądu nasycenia to wielkości rzędu od 10^{-12} do 10^{-6} A). Ta część charakterystyki odpowiada za pracę zaporową diody (polaryzacja wsteczna)

Tak więc, różne wartości zmian prądów i napięć (przewodzenia i wsteczne), które opisują rezystancję dynamiczną diody w poszczególnych częściach jej charakterystyki napięciowo-prądowej określają jej różne stany pracy, a zatem i właściwości:

- gdy do diody przyłożone jest napięcie przewodzenia, rezystancja dynamiczna diody równa $\frac{dV_f}{dI_f}$ jest mała. Umożliwia to przepływ prądu przez złącze – dioda w tej części charakterystyki przypomina załączony łącznik, na którym pojawia się zaledwie niewielki spadek napięcia;
- jeżeli do diody doprowadzane jest napięcie wsteczne, rezystancja dynamiczna diody $\frac{dV_r}{dI_r}$ jest duża – diodę można traktować jako wyłączony łącznik, który uniemożliwia przepływ prądu.

Na ostatnim odcinku charakterystyki diody, zaczynającym się od punktu **C**, prąd wsteczny (I_R) zaczyna szybko narastać. Maksymalne dopuszczalne napięcie wsteczne na diodzie jest ograniczone przez maksymalne napięcie V_{max} , występujące w punkcie **C**. W tym wypadku dzięki odpowiednio dużej wartości napięcia wstecznego, poruszające się nośniki swobodne są przyspieszane a zderzając się z atomami siatki krystalicznej (węzłami) wybijają z zewnętrznych powłok elektronowy elektrony i przenoszą je do pasma przewodnictwa, pozostawiając dziury w paśmie walencyjnym. Proces ten ma charakter lawinowy, który w zależności od typu złącza może spowodować zniszczenie diody.

Przyjmując, że dioda jest idealna, tzn. złącze **p-n** ma zerową szerokość, rezystancja dynamiczna w stanie przewodzenia jest równa zero, wyprowadzenia zewnętrzne warstw półprzewodnika N i P są idealne, charakterystykę prądowo-napięciową diody $I=f(V)$ można opisać **równaniem Shockley'a**:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{V}{\gamma \varphi_T}} - 1 \right) \quad (1.1)$$

gdzie:

- I – prąd diody;
- I_0 – zastępczy prąd wsteczny diody;
- V – napięcie na diodzie;
- γ – współczynnik emisji;
- φ_T – potencjał elektrokinetyczny.

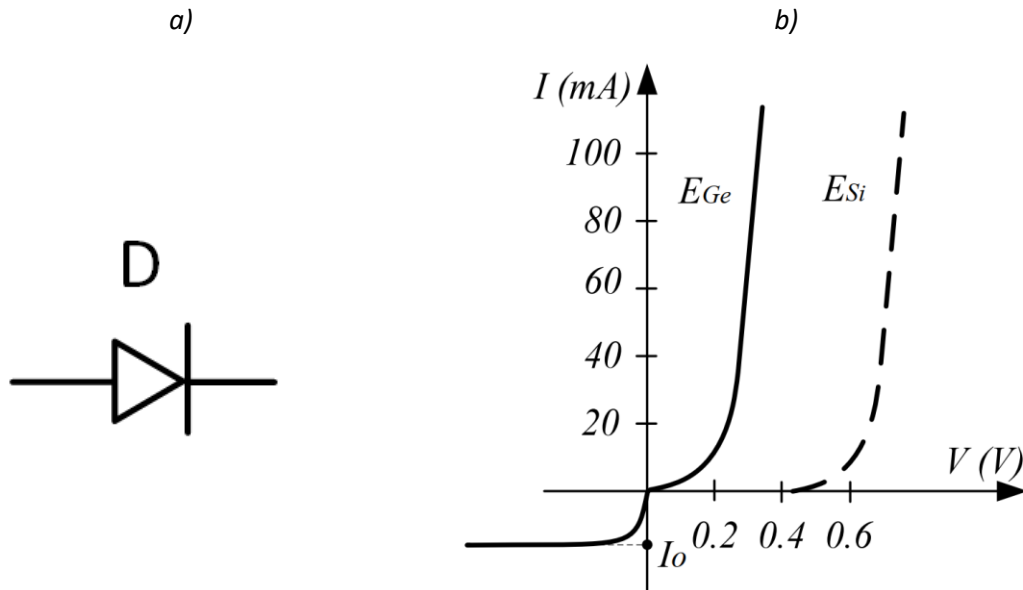
Potencjał elektrokinetyczny φ_T opisuje zależność:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q}, \quad (1.2)$$

gdzie:

k – stała Boltzmanna ($k=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K);
 T – temperatura bezwzględna elementu $T=t + 273^{\circ}\text{C}$ (K);
 q – ładunek elektronu ($q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C);

W temperaturze pokojowej potencjał elektrokinetyczny jest w przybliżeniu równy około $\varphi_T = 25\text{mV}$. Współczynnik emisji γ zależy od technologii zastosowanej podczas produkcji diody i charakteryzuje regularność kształtu i grubość złącza **p-n** ($1 < \gamma < 2,5$). Dla bliskich idealnemu, bardzo cienkich złącza **p-n** współczynnikowi emisji jest równy $\gamma = 1$, a dla szerszych złącza **p-n**, $\gamma = 2$. Dla diod germanowych maksymalna wartość współczynnika emisji $\gamma_{\text{max}} = 2$, a dla diod krzemowych i diod Schottky'ego: $\gamma_{\text{max}} = 2,5$.



Rys. 1.2. Symbol diody (a) oraz charakterystyki prądowo-napięciowe (b) dla diody germanowych (Ge) i krzemowej (Si).

Charakterystyki *prądowo-napięciowe* $I=f(V)$ dla diod germanowych i krzemowych przedstawiono na Rys. 1.2. Skale wartości prądu na osi Y dla prądów wstecznych (wartości ujemne) i dla prądów przewodzenia (wartości dodatnie) są na rysunku różne. **Prądy przewodzenia są o kilka rzędów większe od prądu wstecznego.** Pomimo rozciągniętej skali dla prądu wstecznego, dla diody krzemowej nie przedstawiono go na wykresie, ponieważ zwykle jest on o kilka rzędów mniejszy od prądu wstecznego diody germanowej. Charakterystyki prądowo-napięciowe $I=f(V)$ obu diod przechodzą przez początek układu współrzędnych, ale znaczący prąd w diodach pojawia się dopiero, gdy napięcie na diodzie ma wartość: dla diody germanowej od 0,1 do 0,2 V, a dla diody krzemowej od 0,5 do 0,7 V. Ponieważ szerokość warstwy zaporowej dla krzemie (E_{Si}) jest większa niż dla germanu (E_{Ge}) prąd przewodzenia diody krzemowej jest dla tych samych napięć przewodzenia mniejszy niż diody germanowej. W obszarze przewodzenia jest spełniony warunek $V \gg \varphi_T$, stąd w zależności (1.1) opisującej prąd przewodzenia diody można zaniedbać jedynekę:

$$I = I_0 e^{\frac{V}{\varphi_T}} \quad (1.3)$$

Na podstawie charakterystyki $I=f(V)$ pokazanej na Rys. 1.3 można wyznaczyć rezystancję statyczną oraz dynamiczną diody dla określonego punktu pracy, a także napięcie progowe V_0 . Również tutaj charakterystyka jest przejaskrawiona i należy pamiętać o rzeczywistych wartościach prądów wstecznych oraz napięci przewodzenia diody).

Linearyzując część charakterystyki diody pomiędzy punktami **A** i **B** sieczną można wyznaczyć tzw. napięcie odcięcia V_0 . Dla napięć mniejszych od V_0 rezystancja dynamiczna jest bardzo duża (w idealnej diodzie dąży do nieskończoności). Dla napięć większych od V_0 rezystancja dynamiczna jest bardzo mała (w idealnej diodzie jest równa zero).

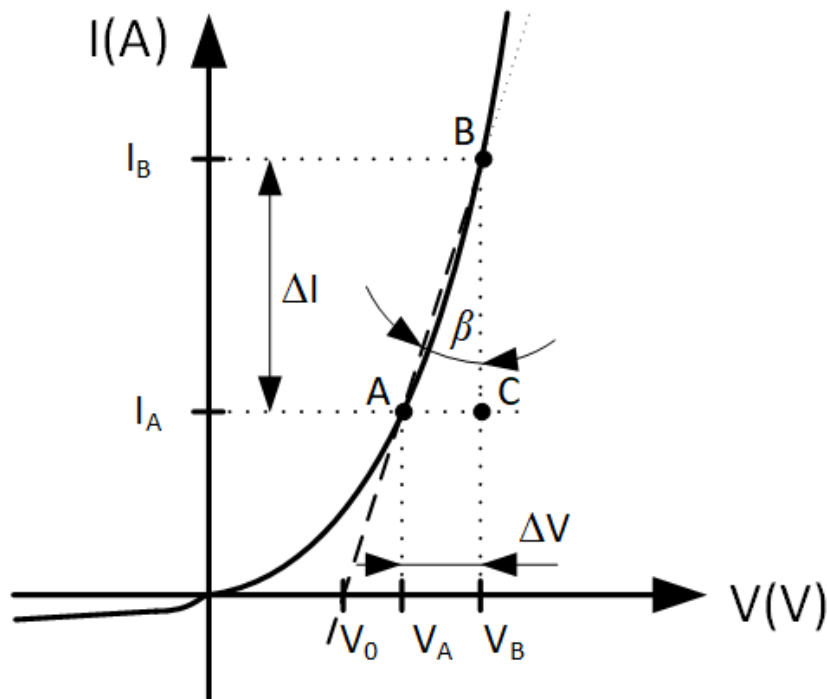
Aby wyznaczyć rezystancję statyczną np. w punkcie pracy **A** należy obliczyć stosunek napięcia V_A i prądu I_A :

$$R_A = \frac{V_A}{I_A}, \quad (1.4)$$

gdzie:

V_A – napięcie stałe zmierzone na diodzie;

I_A – stały prąd przewodzenia diody.



Rys. 1.3 Estymacja parametrów statycznych i dynamicznych diody na podstawie charakterystyki $I=f(V)$

Ponieważ charakterystyka diody jest nieliniowa, częściej (np. dla sygnałów przemiennych AC) do opisu diody w określonym punkcie pracy stosuje się dynamiczną rezystancję diody, która lepiej opisuje monotoniczność charakterystyki $I=f(V)$ w sąsiedztwie tego punktu. Z definicji rezystancja dynamiczna, to stosunek przyrostów napięcia na diodzie i prądu diody:

$$r_{dyn} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (1.5)$$

Dla małych przyrostów (np. wynikających z rzeczywistej rozdzielczości pomiarowej) nieskończone skończone przyrosty ΔV i ΔI można zastąpić pochodną, a sieczna przechodząca przez punkty **A** i **B** (Rys. 1.3) staje się styczną do charakterystyki diody w punkcie **A**, można zatem przyjąć że $r_{dyn,A} = tg\beta$, a w dowolnym punkcie charakterystyki po prostu:

$$r_{dyn} = \frac{dV}{dI} \quad (1.6)$$

Wartość rezystancji dynamicznej można obliczyć jeszcze inaczej, np. przekształcając równanie (1.3) można wyprowadzić zależność:

$$\frac{1}{r_{dyn}} = g_{dyn} = \frac{dI}{dV} = \frac{1}{\varphi_T} (I + I_0), \quad (1.7)$$

zatem:

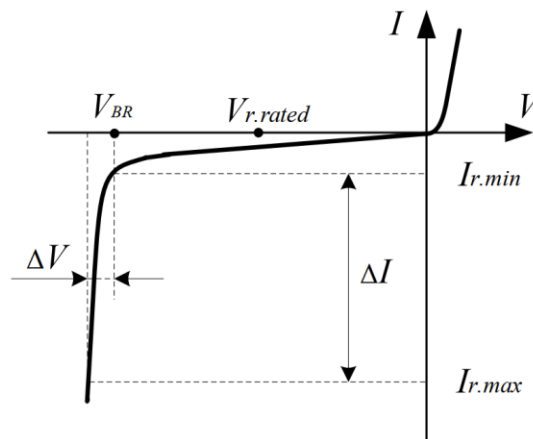
$$r_{dyn} = \frac{\varphi_T}{I+I_0} \approx \frac{\varphi_T}{I}. \quad (1.8)$$

Wraz z przepływem prądu przez diodę, materiał półprzewodnika jest podgrzewany (w szczególności obszar złącza), a w sytuacji, kiedy temperatura przekracza maksymalną dopuszczalną wartość, nastąpi bezpowrotne termiczne uszkodzenie złącza i dioda przestaje działać. W związku z tym, dla danych warunków chłodzenia, prąd przewodzenia diody jest ograniczony przez I_{fmax} maksymalną wartość dopuszczalną.

Każda dioda zbudowana jest tak aby była w stanie blokować zaprojektowane napięcie wsteczne $V_{r, rated}$ zaznaczone na Rys. 1.4, a prąd wsteczny jest znikomy i jest w zakresie 10^{-12} 10^{-6} A w zależności od diody. Wraz ze wzrostem napięcia wstecznego powyżej tej wartości tj. przy napięciu V_{BR} prąd zaczyna gwałtownie wzrastać i występuje przebicie napięciowe złącza **p-n**. Istnieją dwa zasadnicze rodzaje przebicia dla złącz **p-n**, w zależności od domieszkowania półprzewodników, szerokości złącza p-n i temperatury:

- odwracalne (przebiecie elektryczne);
- nieodwracalne (przegrzanie i uszkodzenia powierzchni złącza).

Stan nieodwracalnego przebicia uszkadza złącze i jest zabroniony dla przyrządów półprzewodnikowych.



Rys. 1.4 Część zaporowa charakterystyki prąd-napięcie diody półprzewodnikowej

Z tego powodu maksymalne dopuszczalne napięcie wsteczne V_{BR} odpowiadające początkowemu napięciu przebicia złącza p-n jest zawsze podane w notach katalogowych i specyfikacji diody. Wartość znamionowa napięcia wstecznego diody jest zwykle równa **0,5** V_{BR} , i określa klasę napięciową przyrządu: klasa 1 odpowiada napięciu wstecznemu 100 V, klasa 2 – napięciu wstecznemu 200 V, itd.

Oprócz diod ze złączem **p-n** istnieje również szeroka gama diod ze złączem metal-półprzewodnik zwanych **diodami Schottky'ego**. Złącze utworzone na styku metalu i półprzewodnika ma również tę właściwość co dioda ze złączem **p-n**, a mianowicie przewodzi prąd jednokierunkowo. Bariera potencjałów na styku metalu z półprzewodnikiem jest nazywana barierą Schottky'ego. Ze względu na niewielki wymiary obszaru złącza i dużą szerokość warstwy zaporowej dioda taka charakteryzuje się niewielką pojemnością elektryczną (maksymalnie 1 pF). Ze względu na brak wstrzykiwania nośników mniejszościowych do obszaru półprzewodnika, nie zachodzą tu procesy gromadzenia i odprowadzania ze złącza nośników ładunku i z tego powodu czasy przełączeń w stanach przejściowych, są bardzo krótkie (ułamki nanosekund) i są związane wyłącznie z procesem przeładowania pojemności elektrycznej złącza. Ze względu na te właściwości dioda Schottky'ego jest powszechnie stosowana w urządzeniach impulsowych, gdzie czasy przełączeń są bardzo krótkie.

Parametry dynamiczne diod półprzewodnikowych

Przejście diody ze stanu zaporowego do stanu przewodzenia, podobnie jak ze przewodzenia do stanu zaporowego nie odbywa się natychmiastowo z powodu istnienia tzw. **pojemności pasywniczej złącza p-n** i **pojemności rozproszenia**.

W złączu spolaryzowanym zaporowo najistotniejsza jest **pojemnością złącza**, która znacząco zależy od przyłożonego napięcia. **Pojemność złącza** jest związana z niezrównoważonym ładunkiem jonowym w obszarze złącza **p-n**. W rzeczywistości jest ona proporcjonalna do powierzchni złącza i odwrotnie proporcjonalna do jego szerokości, a zatem zmniejsza się wraz ze wzrostem napięcia wstecznego. Dlatego też proces przejścia ze stanu zaporowego do stanu przewodzenia nie ma szczególnego znaczenia.

Rzecz ma się odwrotnie w przypadku przejścia ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego, ponieważ po doprowadzeniu do diody napięcia przewodzenia szerokość złącza zmniejsza się, co powoduje zwiększenie pojemności złączeniowej, którą jednak i tak można zaniedbać, ponieważ w obszarze złącza powstaje dodatkowa pojemność dyfuzyjna znacznie większa niż pojemność złącza. Pojemność dyfuzyjna w złączu p-n spolaryzowanym w kierunku przewodzenia powstaje w wyniku gromadzenia się w obszarze złącza dodatkowych ładunków (nadwyżka nośników mniejszościowych ładunku) i zależy od prądu przepływającego przez złącze. Zwiększenie napięcia przewodzenia prowadzi do wzrostu niezrównoważonego i indukowanego w złączu ładunku. Ponieważ przyrosty ładunku są większe niż przyrosty napięcia na złączu to zgodnie z definicją pojemności elektrycznej, pojemności złącza rośnie. Czas usuwania ładunku nadmiarowego ze złącza znacząco wpływa na czas przejścia diody ze stanu przewodzenia do stanu wyłączenia. Dla diod małej mocy czasy te mają wartości setek nanosekund. W starszych typach diod prostowniczych dużej mocy czas wyłączenia może być znacząco dłuższy (setki mikrosekund).

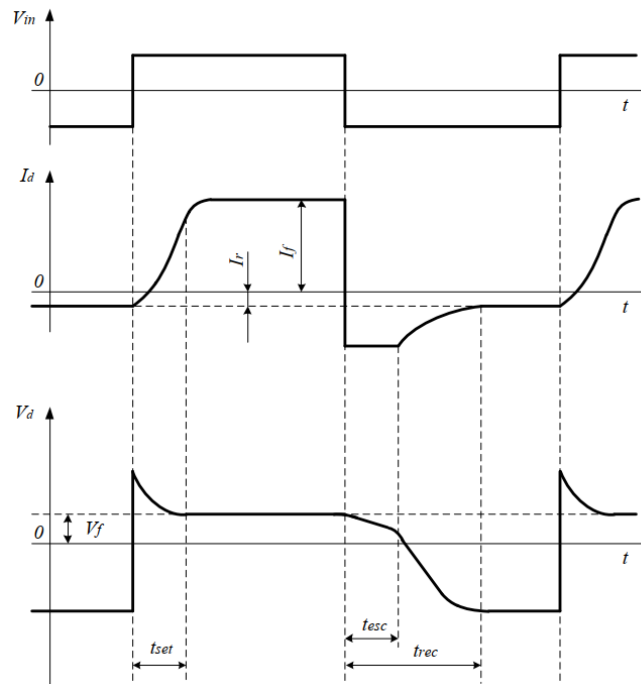
Dlatego też jednym z głównych parametrów diod prostowniczych i impulsowych jest **czas odzyskiwania właściwości zaporowych**, nazywany również czasem wyłączenia (*ang. recovery time, t_{rec}*), jest to czasu wymagany do odzyskania wysokiej rezystancji wstecznej, gdy dioda zmienia stan pracy ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego przy określonym napięciu wstecznym. W celu ilustracji procesów dynamicznych zmiany stanu przewodzenia diody na Rys. 1.5 pokazano przykładowe przebiegi prądu i napięcia diody przy zasilaniu układu rezystor-dioda napięciem prostokątnym. Również tutaj warto wskazać iż pokazane przebiegi napięcia i prądu diody są celowo przejawione w celu lepszej ilustracji zachodzących zjawisk – dotyczy to zarówno osi czasu jak i osi napięcia i prądu diody. Nie mniej, można tutaj zauważyć, że kiedy napięcie zasilające V_{in} zmienia się skokowo z wartości ujemnej na dodatnią i polaryzuje diodę w kierunku przewodzenia to pomimo pojemnościowego charakteru obwodu, prąd diody, ze względu na dyfuzję nośników w złączu, nie zmienia się skokowo. Dopiero po ustaleniu się tego procesu (czas załączania – t_{set}) spadek napięcia na diodzie ustala się na poziomie V_f , a prąd diody można obliczyć ze znanej zależności:

$$I_f = \frac{V_{in} - V_f}{R_L} \quad (1.9)$$

Skokowa zmiana napięcia V_{in} z wartości dodatniej na ujemną polaryzuje diodę w kierunku zaporowym. Podczas wyłączenia zachodzą następujące procesy:

- w czasie wyłączenia t_{rec} – co całość procesu rozładowania ładunku ze złącza i odzyskiwania zdolności blokowania przepływu prądu. Widać tutaj, że po upływie czasu t_{esc} dioda stopniowo zaczyna odzyskiwać te właściwości co można zauważyć po zmniejszającej się wartości prądu oraz wzroście ujemnego napięcia na diodzie (napięcia blokowania) - proces ten ma charakter wykładniczy. Po jego zakończeniu dioda w pełni odzyskuje właściwości zaporowe tzn. rezystancja dynamiczna jest bardzo duża stąd też prąd ograniczony jest do wartości prądu nasylenia/zaporowego I_r .

- w czasie t_{esc} opóźnienia wyłączenia - jest odprowadzany ładunek zgromadzony w złączu, dopóki to nie nastąpi, dioda dalej przewodzi, co skutkuje: pojawieniem się ujemnego prądu (z racji zmiany napięcia zasilającego) oraz utrzymywaniem się napięcia na diodzie bliskiemu napięcia przewodzenia V_f ;



Rys. 1.5 Przebiegi prądów i napięć na diodzie w trakcie zmiany stanu pracy

Stabilistory

Stabilistory to diody półprzewodnikowe, które w układach elektronicznych pełnią rolę źródeł napięcia stałego. Budowane są wyłącznie na bazie krzemu. Efekt stabilizacji napięcia uzyskuje się w wyniku specjalnego ukształtowania charakterystyki prądowo-napięciowej złącza półprzewodnikowego spolaryzowanego w kierunku zaporowym (diody Zenera) takim lub w kierunku przewodzenia (stabilistory), że napięcie na zaciskach stabilistora jest praktycznie stałe i nie zależy od płynącego w nim prądu. Dla stabilistorów istotna jest zatem charakterystyka prądowo-napięciowa znajdująca się w III ćwiartce prostokątnego układu współrzędnych. W stabilistorach występują dwa zjawiska powodujące nieniszczące przebicie złącza p-n: zjawisko Zenera i zjawisko lawinowe. W przebiciu Zenera występuje tzw. przejście tunelowe, w zjawisku lawinowym przebicie lawinowe.

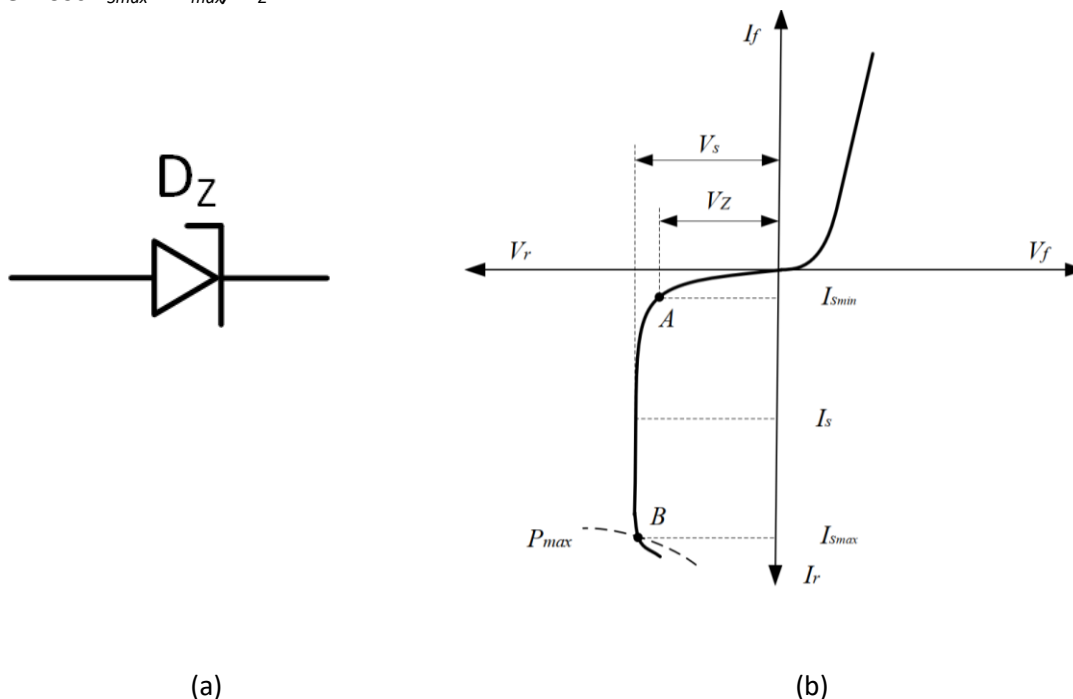
Przejście tunelowe (przebicie Zenera) spowodowane jest bezpośrednim przejściem elektronów swobodnych z pasma walencyjnego w warstwie półprzewodnika typu **p** do pasma przewodnictwa w warstwie półprzewodnika typu **n**. Staje się to możliwe, gdy natężenie pola elektrycznego w złączu **p-n** osiąga $4 \cdot 10^5$ V/cm dla złącz krzemowych i $2 \cdot 10^5$ V/cm dla złącz germanowych. Tak duże natężenie pola elektrycznego jest możliwe w cienkich złączach w przypadku silnego domieszkowania obszarów **p** i **n**. W tym wypadku górna krawędź pasma walencyjnego elektronów w obszarze typu **p** będzie powyżej dolnej krawędź pasma przewodzenia elektronów w obszarze typu **n**. Dlatego, jeśli elektron znajdujący się w paśmie walencyjnym w obszarze typu **p** przejdzie przez obszar złącza do obszaru typu **n**, to bez zmiany energii stanie się tam elektronem swobodnym. Takie przejście elektronu przez obszar złącza bez zmiany energii z obszaru **p** do obszaru **n** nazywane jest przejściem tunelowym.

Zjawisko to zanika, gdy zmniejszy się napięcie na złączu poniżej napięcia Zenera, tzn. zmniejszy się wartość natężenia pola elektrycznego w obszarze złącza.

Przebiecie lawinowe występuje, przy większych napięciach wstecznych niż przejście tunelowe. W tym wypadku obszar złącza poszerza się i nośniki przechodzące przez ten obszar, w wyniku działania silnego pola elektrycznego uzyskują duże energie kinetyczne. Zderzając się z węzłami sieci krystalicznej (z atomami) przekazują im część swojej energii, co powoduje jonizację atomów tzn. tworzenie nowych par dziura – swobodny elektron. Pojawiają się w ten sposób nowe nośniki, które również są przyspieszane, zderzają się z węzłami sieci itd. Proces ten nabiera charakteru lawinowego i nazywany jest *przebieciem lawinowym* - jednak nie powoduje on uszkodzenia złącza. Efektem tego procesu jest gwałtowny wzrost prądu wstecznego diody w obwodzie; prąd ten nazywa się *prądem jonizacji lawinowej* i był już pokazywany wcześniej w przypadku charakterystyk III ćwiartki diod prostowniczych (V_{BR})

W stabilistorach występują oba wyżej opisane zjawiska: Zenera i lawinowe, przy czym w zakresie napięć przebiecia mniejszych od około 6 V dominującym jest zjawisko Zenera, a w zakresie napięć przebiecia większych od 8 V dominującym zjawiskiem jest zjawisko lawinowe. Najlepsze stabilistory, w których oba zjawiska występują w podobnym stopniu to stabilistory o napięciach 6 – 8V. Symbol stabilistora i jego charakterystykę prądowo-napięciową $I=f(V)$ przedstawiono odpowiednio na Rys. 1.6 a) i b).

Zakres bezpiecznego położenia punktu pracy stabilistora (III ćwiartka prostokątnego układu współrzędnych) na jej charakterystyce prądowo-napięciowej znajduje się pomiędzy punktami A i B (Rys. 1.6). W punkcie A następuje przebiecia złącza p-n. Napięcie przebiecia V_Z nazywane napięciem Zenera jest formowane w trakcie procesu produkcyjnego diody. Wymagane napięcie V_Z można uzyskać zmieniając, przez odpowiednie domieszkowanie, rezystancję płytki krzemowej. Punkt B jest określony przez maksymalną dopuszczalną moc strat P_{max} jaka może zostać rozproszona na złączu diody. Przekroczenie tej mocy powoduje uszkodzenie złącza. Maksymalny prądu diody I_{Smax} szacuje się z zależności $I_{Smax} = P_{max} / V_Z$.

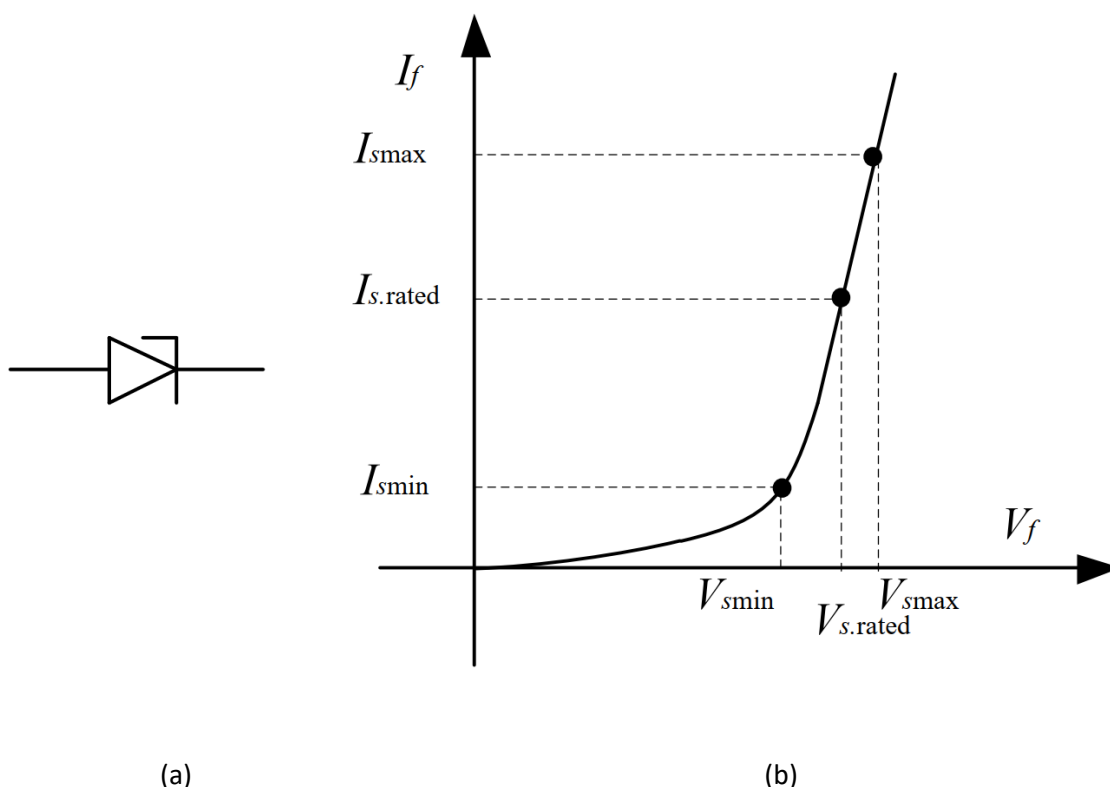


Rys. 1.6. Dioda Zenera: a) symbol; b) charakterystyka prądowo-napięciowa $I=f(V)$.

Poza wspomnianym napięciem przebiecia wstecznego V_Z istotnym parametrami stabilistora pokazanymi na Rys. 1.6b, jest Napięcie stabilizacji V_s - reprezentuje napięcie na diodzie Zenera dla określonej wartości prądu. Zależy ono od szerokości warstwy zaporowej złącza p-n, tj. poziomu

domieszkowania złącza. Im wyższy poziom domieszkowania, tym mniejsza szerokość złącza p-n i zjawisko przebicia (Zenera lub lawinowe) występuje dla niższych wartości napięć. W przypadku niskiego poziomu domieszkowania złącze p-n ma większą szerokość i zanim nastąpi zjawisko przejścia tunelowego następuje przebicie lawinowe w tym wypadku uszkadzające złącze.

Do stabilizacji niskiego napięcia (poniżej 1V) wykorzystywana jest początkowa część charakterystyki prądowo-napięciowej $I=f(V)$ diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia, kiedy spełniony jest warunek $V_s > V_{smin}$. Przystroje półprzewodnikowe pracujące w tej części charakterystyki nazywane są **diody referencyjnymi (stabistor)**. Symbol takiej diody i jej charakterystykę prądowo-napięciową $I=f(V)$ pokazano odpowiednio na Rys. 1.7 a) i b). Stosuje się diody referencyjne krzemowe lub selenowe.



Rys. 1.7. Dioda referencyjna: a) symbol; b) charakterystyka prądowo-napięciowa $I=f(V)$.

Podsumowując, niezależnie od tego czy do stabilizacji napięcia wykorzystywana jest dioda Zenera, czy też dioda referencyjna, można wymienić szereg charakterystycznych właściwości:

Główne parametry stabilistorów i ich typowe wartości:

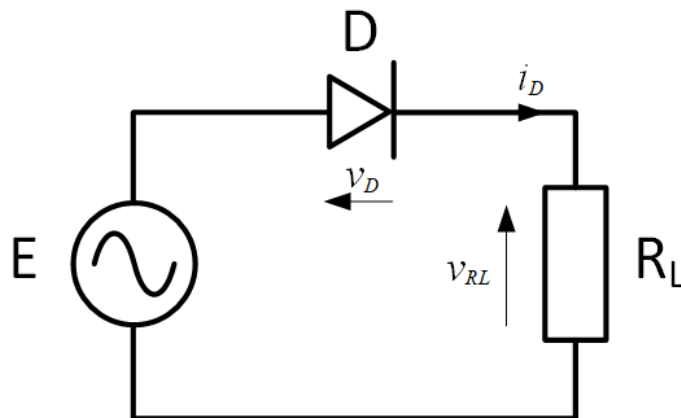
1. $V_{s.rated}$ - napięcie stabilizacji, tj. spadek napięcia na stabilistorze dla znamionowego prądu stabilizacji (od kilku do kilkudziesięciu woltów).
2. I_{smin} - minimalny prąd stabilizacji ($I_{smin} \approx 3\text{mA}$), prąd, przy którym w pobliżu napięcia V_z charakterystyka prądowo-napięciowa silnie zagina się.
3. $I_{s.rated}$ - znamionowy prąd stabilizacji, który odpowiada środkowej części obszaru roboczego na charakterystyce prądowo-napięciowej stabilistora w zakresie stabilizacji (III ćwiartka prostokątnego układu współrzędnych), zwykle ma wartość kilkudziesięciu mA.

4. I_{Smax} - maksymalny prąd stabilizacji (od kilkudziesięciu do kilkuset mA), który jest ograniczony przez dopuszczalną wartość mocy strat.
5. $r_d = \frac{dV_s}{dI_s} \approx \frac{\Delta V_s}{\Delta I_s}$ - rezystancja dynamiczna, która charakteryzuje nachylenie charakterystyki prądowo-napięciowej $I=f(V)$ diody w zakresie stabilizacji napięcia (III ćwiartka prostokątnego układu współrzędnych), od dziesiątej części oma do kilkuset omów.

Przykłady zastosowania diody

Prostownik diodowy

Działanie diody półprzewodnikowej w układzie elektronicznym można omówić na przykładzie prostownika jednopółkowego (jednopulsowego), dzięki któremu odbiornik zasilany jest napięciem zmiennym o wyłącznie dodatnich wartościach podczas gdy napięcie wejściowe E ma charakter przemienny. Schemat przedstawiony na Rys. 1.8 obrazuje układ prostownika



Rys. 1.8. Schemat prostownika jednopółkowego

i składa się z szeregowo połączonych elementów: E , D , R_L gdzie:

E - źródło napięcia przemiennego;

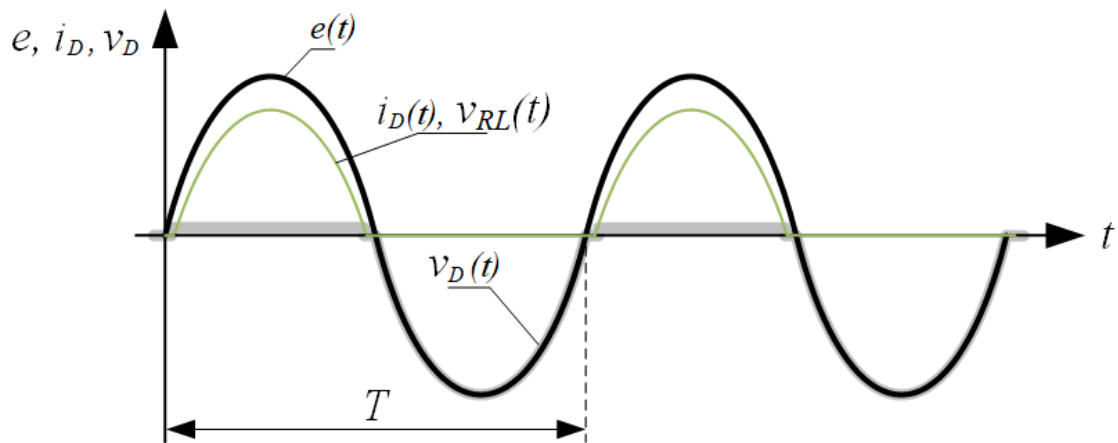
D - dioda półprzewodnikowa

R_L - odbiornik zamodelowany przy pomocy rezystancji

v_{RL} - napięcie wyprostowane (wyjściowe);

i_D - prąd odbiornika (wyprostowany);

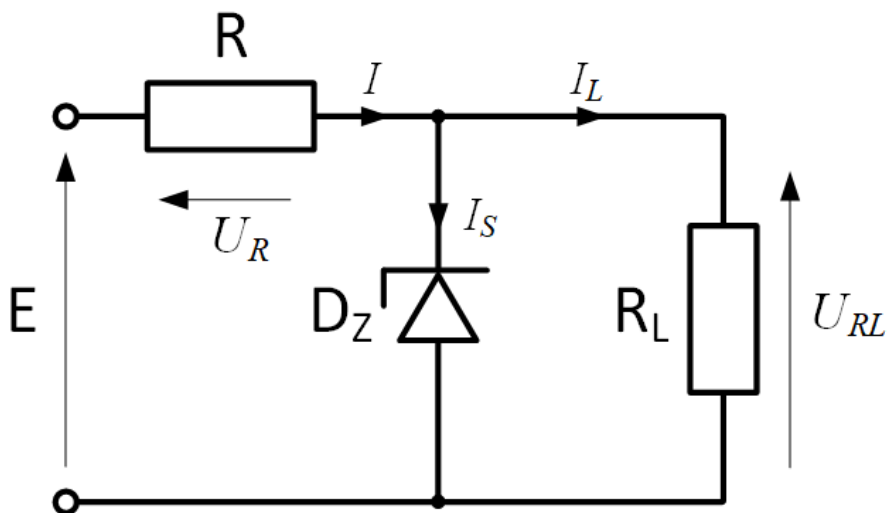
Przebiegi napięć i prądu w tym układzie przedstawiono na Rys. 1.9. Dla dodatniej półfali napięcia źródła napięcia w układzie płynie prąd. Ma on charakter impulsowy. Ze względu na budowę takie prostowniki stosowane są w prostych zasilaczach. Chcąc jednak uzyskać niewielkie tętnienia napięcia wyjściowego wymagają one zastosowania filtrów tętnień lub zwiększenia ilości wyprostowanych półfal napięcia zasilającego (np. mostek Greatza, lub (w przypadku zasilania 3-fazowego) prostowniki: 3, 6 i 12 pulsowe; najmniejsze tętnienia uzyskuje się stosując wysoką ilość pulsów oraz filtrów tętnień).



Rys. 1.9. Przebiegi napięcia zasilającego, prądu, napięcia na odbiorniku napięcia oraz napięcia na diodzie w układzie prostownika jednopółkowego.

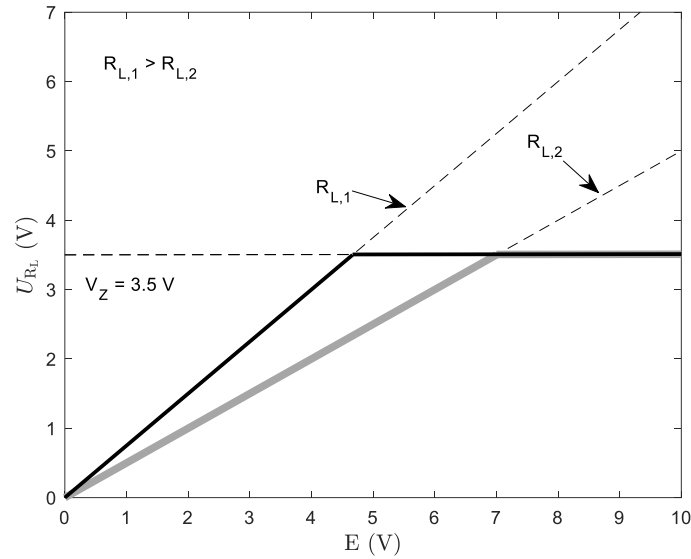
Dioda Zenera

Stabilistory są używane głównie wtedy, gdy wymagana jest w układzie elektronicznym stabilizacja napięcia stałego. Schemat obwodu stabilizatora parametrycznego ze stabilistorem pokazano na Rys. 1.10. Równoległe do zacisków stabilistora jest dołączony odbiornik o rezystancji R_L . Szeregowo z odbiornikiem i stabilistorem podłączony jest rezystor ograniczający R , który jest elementem niezbędnym do poprawnego funkcjonowania układu.



Rys. 1.10. Schemat stabilizatora parametrycznego ze stabilistorem

Zasada działania tego układu jest stosunkowo prosta i została pokazana na Rys. 1.11 dla idealnej diody Zenera o napięciu przebicia wynoszącym 3,5V. Charakterystyka ta ilustruje zależność napięcia wyjściowego od zmian napięcia wejściowego E , dla dwóch wybranych wartości rezystancji obciążenia. Dopóki napięcie na dzielniku R_1 , R_L nie przekroczy napięcia Zenera, układ działa jak dzielnik napięcia. Powyżej tej wartości napięcie stabilizuje się na wartości Zenera.



Rys. 1.11. Stabilizacja napięcia wyjściowego

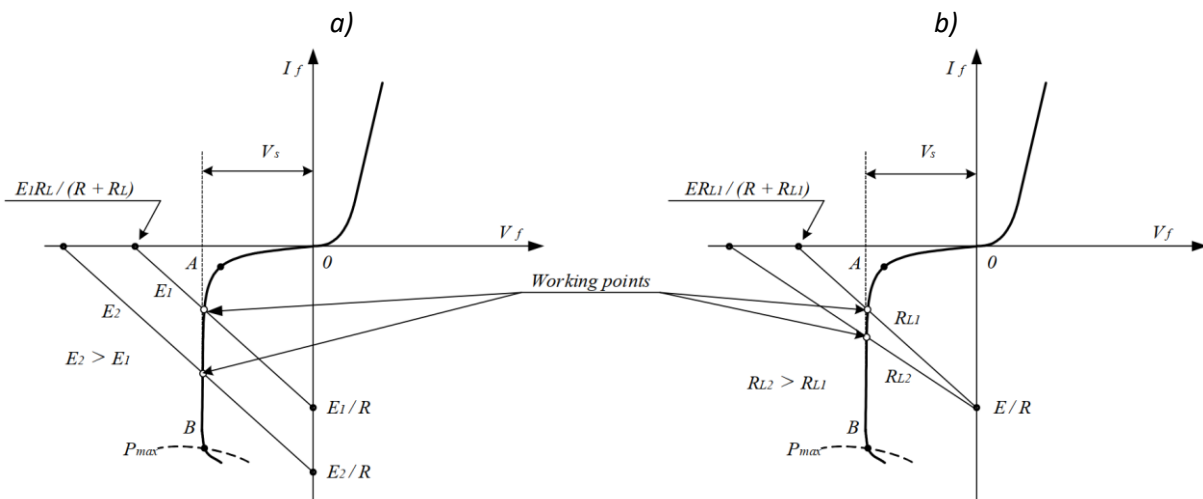
Obwód przedstawiony na Rys. 1.10 można przeanalizować rozwiązując równanie:

$$E = IR + U_S = (I_S + I_L)R + U_S = \left(I_S + \frac{V_S}{R_L}\right)R + U_S, \quad (1.10)$$

po, którego przekształceniu można zauważyć, że:

$$I_S = \frac{E}{R} - \left[\frac{(R+R_L)V_S}{RR_L}\right]. \quad (1.11)$$

Korzystając z zależności (1.11) można wykreślić na charakterystyce prądowo-napięciowej $I=f(V)$ stabilizatora prostą obciążenia. Punkt, w którym prosta obciążenia przecina charakterystykę $I=f(V)$ stabilizatora nazywany jest punktem pracy. Wraz ze zmianą napięcia źródła E prosta obciążenia przesuwa się równoległe po charakterystyce (Rys. 1.12 a).



Rys. 1.12. Charakterystyka prąd-napięcie $I=f(V)$ diody Zenera oraz proste obciążenia

W ten sposób, jeśli punkt pracy pozostaje w granicach obszaru wyznaczonego przez punkty A i B, to napięcie na obciążeniu pozostaje praktycznie niezmienione. Stąd w tym obwodzie napięcie na obciążeniu pozostaje stałe dla przyjętych zmian napięcia źródła i zmian rezystancji obciążenia.

Z fizycznego punktu widzenia zasada stabilizacji napięcia w danym obwodzie jest następująca:

- przyrost napięcia źródłowego o ΔE powoduje przyrost całkowitego prądu obwodu $I = I_S + I_L$. Ponieważ razem z przyrostem prądu przepływającego przez stabilistor napięcie na nim pozostaje praktycznie niezmienione i równe napięciu stabilizacji, można zaniedbać zmianę prądu obciążenia I_L . Przyrost napięcia źródła ΔE odłoży się więc w przybliżeniu w pełni na rezystorze ograniczającym R .
- Wraz ze spadkiem napięcia źródła o ΔE całkowity prąd obwodu maleje, co prowadzi do zmniejszenia prądu płynącego przez stabilistor. Jeśli po tej redukcji punkt pracy nadal pozostaje w granicach obszaru stabilizacji wyznaczonego przez punkty A i B to, napięcie na obciążeniu pozostanie niezmienione, a napięcie na rezystorze R zmniejszy się o ΔE . Wartość rezystancji R można obliczyć za zależności:

$$R = \frac{E - U_S}{I_S + I_L}, \quad (1.12)$$

Zmiana rezystancji obciążenia R_L dla stałego napięcia źródła E nie prowadzi do zmiany napięcia na ograniczającym rezystorze R , ale powoduje zmianę prądu stabilistora (Rys. 1.12b).

Główne parametry stabilizatora parametrycznego:

1. Współczynnik stabilizacji napięcia: $K_{S,V} = \frac{\Delta V_{in}}{V_{in}} \cdot \frac{V_{out}}{\Delta V_{out}}$;
2. Współczynnik stabilizacji prądu: $K_{S,I} = \frac{\Delta I_L}{I_L} \cdot \frac{V_{out}}{\Delta V_{out}}$;
3. Rezystancja wyjściowa: $R_{out} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_L}$;
4. Sprawność: $\eta = \frac{P_L}{P_{in}}$

gdzie:

$$P_L = V_{out} I_L - \text{moc wyjściowa (na obciążeniu);}$$

$$P_{in} = V_{in} I_{in} - \text{moc wejściowa.}$$

Aproksymacja charakterystyk diody przy pomocy funkcji wykładniczej

Na podstawie zebranych danych do wykreślenia charakterystyki diod można uzyskać przybliżone równanie charakterystyczne dzięki wykorzystaniu narzędzia do aproksymacji wybraną funkcją; należy przy tym pamiętać, że wykorzystanie aproksymacji funkcją wykładniczą wyklucza punkty o ujemnych współrzędnych na osi y (jeśli występują).

W celu określenia współczynnika emisyjności γ i wstecznego prądu nasycenia I_0 diody, należy uzyskać wykładnicze równanie przybliżone dla I-szej ćwiartki charakterystyki $I=f(V)$. Aby uzyskać przybliżone równanie, otwórz zapisany plik danych oraz uzyskaj równanie w postaci:

$$y = Ae^{Bx}, \quad (1.13)$$

gdzie: $A = I_0$, $B = \frac{1}{\gamma \varphi_T}$. Następnie posługując się parametrami uzyskanego równania przybliżonego, obliczyć współczynnik emisyjności γ i określ wsteczny prąd nasycenia I_0 .

Aby określić napięcie odcięcia V_0 diody, należy uzyskać przybliżenie liniowe równania fragmentu charakterystyki (w I ćwiartce wykresu) zbliżonej liniowej i wybrać aproksymację liniową o postaci:

$$y = kx + a, \quad (1.14)$$

Następnie, na podstawie odcinka liniowego charakterystyki $I=f(V)$ należy określi rezystancję dynamiczną diody dla wartości prądu wskazanej przez prowadzącego. Do określania rezystancji dynamicznej wykorzystaj wartości można wykorzystać zarówno rzeczywistą (zmierzoną) charakterystykę aproksymowaną funkcją wykładniczą, lub też skorzystać z dwuodcinkowej charakterystyki aproksymowanej liniowo.

1.2. Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego

Ćwiczenie nr 1: Elementy elektroniczne - diody

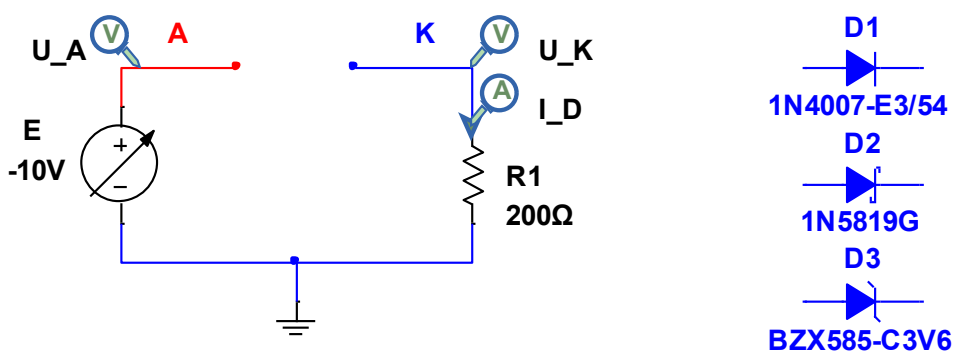
Materiały obowiązujące na teście i w trakcie realizacji ćwiczenia:

- 1) Wprowadzenie teoretyczne do diod
- 2) Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego
- 3) Noty katalogowe diod: 1N4007, 11DQ04, LSM115 (stacjonarnie), lub 1N4007, 1N5819G, BZX79-A10 – w przypadku pracy zdalnej.
- 4) Znajomość obsługi stanowiska laboratoryjnego NI Elvis (Industrial Electronics)

Cel ćwiczenia: Zapoznanie się z podstawowymi właściwościami elementów półprzewodnikowych jakimi są diody – w tym diody prostownicze, diody Schottky'ego oraz diody Zenera, a w szczególności z ich charakterystykami prądowo-napięciowymi oraz właściwościami dynamicznymi. Dodatkowo, w zakres ćwiczenia wchodzi zapoznanie się z podstawowymi układami wykorzystującymi diody, takimi jak: prostownik jedno-pulsowy czy też stabilizator.

1. Wykreślenie charakterystyk prądowo-napięciowych wybranych diod, a następnie porównanie ich na wspólnym wykresie, a także wyznaczenia współczynnika emisyjności γ .

W tej części ćwiczenia należy uzyskać charakterystyki prądu diody w funkcji napięcia diody (tzw. charakterystyka napięciowo-prądowa) dla wybranych elementów: **1N4007**, oraz **1N5819G**, a także dla **BZX79-A10**. W tym celu należy dokonać zbudować obwód testowy składający się z szeregowo połączonych: źródła diody i rezystora – tak jak to pokazano na Rys. 13. W celu otrzymania punktów pomiarowych należy odpowiednio (z określonym krokiem) stopniowo zmieniać wartości napięcia źródła zasilającego, aby uzyskać punkty charakterystyki zarówno w kierunku przewodzenia jak i w kierunku blokowania. Rozdzielczość pomiarowa powinna być zwiększona w charakterystycznych punktach – tj. w przypadku diod prostowniczych w okolicy napięcia progowego, natomiast w przypadku diod Zenera – również w okolicach napięcia Zenera.



Rys. 13 Schemat układu do pomiaru właściwości diod

Na podstawie otrzymanych danych należy:

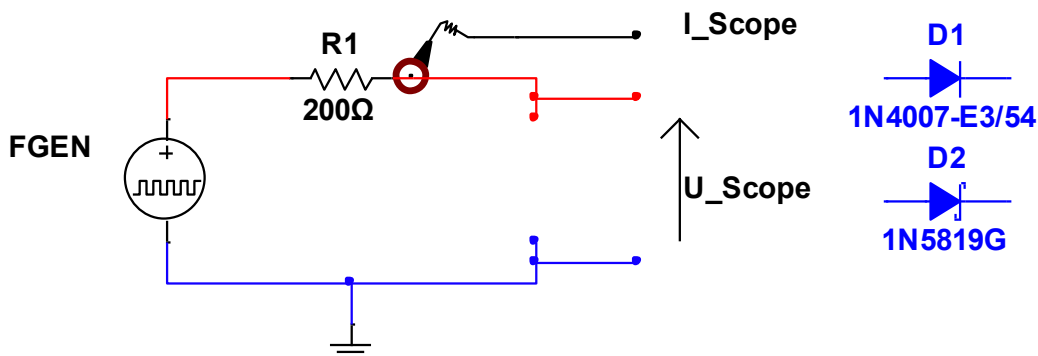
- a) porównać charakterystyki diod na jednym wspólnym wykresie oraz na ich podstawie określić: współczynniki emisyjności γ , a także wartości rezystancji dynamicznej w określonym punkcie pracy przy pomocy aproksymacji funkcją wykładniczą;

- b) wyznaczyć rezystancję dynamiczną w wybranym punkcie (lub w wyznaczonym zakresie) z wykorzystaniem współczynnika emisyjności i prądu nasycenia
- c) wyznaczyć wartości napięć progowych oraz rezystancji wykorzystaniem aproksymacji dwuodcinkowej z pomocą funkcji liniowych
- d) porównać i zilustrować różnice w prądzie wstecznym badanych elementów

2. Obserwacja i analiza właściwości dynamicznych wybranych diod

Ćwiczenie to polega na badaniu czasów trwania poszczególnych zjawisk towarzyszących procesom załączania i wyłączenia diody. W przypadku załączenia (przekroczenia wartości napięcia progowego diody) badany jest czas po którym dioda zaczyna przewodzić, natomiast w przypadku przejścia diody ze stanu przewodzenia do stanu blokowania badany jest czas w którym dioda zaczyna odzyskiwać właściwości blokowania. W celu zaobserwowania tych zjawisk należy połączyć obwód jak na Rys. oraz odpowiednim podłączeniu sond pomiarowych U_Scope, oraz I_Scope. Źródło prostokątnego napięcia przemiennego o częstotliwości $f = 40 \text{ kHz}$ i wartości $U_{pk-pk} = 2 \text{ V}$, pozwala na cykliczną zmianę stanu diody z przewodzenia do blokowania (i na odwrót) z zapewnieniem dużych stromości zmian prądu.

Uwaga: w przypadku stanowiska laboratoryjnego do pomiaru prądu należy wykorzystać przetwornik I->U oraz pamiętać o tym, iż sondy oscyloskopu mają wspólną masę, która dodatkowo jest tą samą do której podłączone jest źródło zasilania FGGEN.



Rys. 1.2.2. Badanie właściwości dynamicznych diody

Badanie układu polega na:

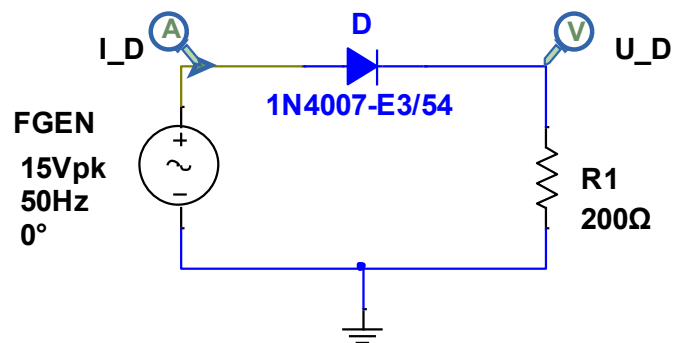
- a) Przedstawieniu przebiegów prądów i napięć diod (a także napięcia zasilającego) dla dwóch wybranych elementów; przebiegi należy przedstawić czytelnie: osobno dla procesu załączania jak i procesu wyłączenia diody
- b) Dokładnym zmierzeniu czasów t_{sec} , t_{esc} , t_{rec} ,
- c) Omówieniu i wyjaśnieniu różnic powstałymi pomiędzy wynikami rzeczywistymi, a teoretycznymi

3. Przykłady zastosowania diod

Ta część ćwiczenia skupia się na praktycznych układach wykorzystujących diody.

3.1 Prostowniki

W tej części ćwiczenia należy podstawowy układ prostowniczy jakim jest jedno-pulsowy sieciowy prostownik napięcia, którego sposób podłączenia przedstawiony jest na Rys. , gdzie rezystancja R1 symbolizuje odbiornik prądu stałego.



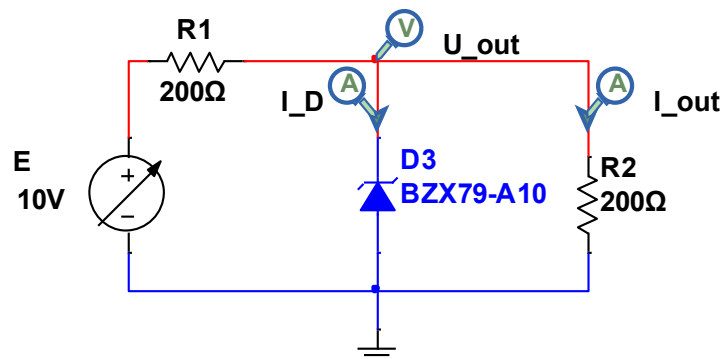
Rys. 1.2.3. Jedno-pulsowy prostownik diodowy

W oparciu o powyższy schemat połączenia należy:

- Przedstawić przebiegi prądów i napięć każdego z elementów
- Omówić i wyjaśnić kształt przebiegu napięcia na diodzie
- Zmierzyć oraz porównać z obliczoną teoretycznie wartością średnią napięcia wyprostowanego.
- Obliczyć moc dostarczoną do odbiornika
- Omówić tętnienia napięcia i prądu wyjściowego
- Omówić zastosowania badanego układu; proszę wskazać wady i zalety

3.2 Stabilizator

W tej części ćwiczenia należy podłączyć układ jak na Rys. .



Rys. 1.2.4. Stabilizator z diodą Zenera

Następnie należy wykreślić charakterystyki:

- a. Napięcia wyjściowego w funkcji zmian napięcia wejściowego
- b. Napięcia wyjściowego w funkcji zmian prądu obciążenia
- c. Obliczyć z jaką mocą pracuje dioda Zenera w wybranych warunkach pracy
- d. Wyznaczyć parametry stabilizacji napięcia
- e. Obliczyć sprawność układu $\eta = P_L/P_{in}$ w wybranym punkcie pracy lub wyznaczonym zakresie pracy.

1.3. Zawartość raportu z przebiegu ćwiczenia

Laboratorium podstaw elektroniki SK2A – Ćw. 1 Elementy elektroniczne - diody					
Rodzaj studiów:	Stacjonarne		Kierunek studiów:	Elektrotechnika	
Grupa dziekańska:		Data i godzina:		Nr zespołu:	
Skład zespołu:					

1a. Wykreślanie charakterystyk prądowo-napięciowych wskazanych elementów półprzewodnikowych

Schemat analizowanego układu:

Uzyskane dane:

(proszę załączyć na końcu dokumentu odpowiednio opisaną tabelę z danymi zapisanymi w pliku excell)

Porównanie charakterystyk na wspólnych wykresie:

1b. Wyznaczanie współczynników γ badanych elementów

Obliczenia:

<i>Element</i>	<i>funkcja</i>	γ
1N4007		
11DQ04/1N5819G		

1c. Rezystancji statycznej i dynamicznej wybranych diod

Obliczenia:

2 a. Wyznaczanie właściwości dynamicznych diod:

Porównanie przebiegów dla diody 1N4007 oraz dla diody Schottky'ego:

(a)	(b)

<i>Element</i>	<i>Symbol</i>	t_{set}	t_{rec}	t_{esc}
Dioda prostownicza				
Dioda Schottky'ego				

3a. Wyznaczenie średniej wartości napięcia wyprostowanego prostownika jedno-pulsowego

Schemat układu:

Przebiegi wybranych prądów i napięć:

Obliczenia:

3b. Wyznaczanie współczynnika stabilizacji w stabilizatorze z diodą Zenera.

Schemat analizowanego układu:

Przebiegi wybranych prądów i napięć:

Charakterystyki napięcia wyjściowego względem: a) napięcia wejściowego, b) zmian prądu obciążenia

(a)	(b)

Wyznaczenie współczynnika stabilizacji:

5. Porównanie - wnioski.

1.4. Przykładowe pytania sprawdzające

- Jak wygląda Idealna charakterystyka diody prostowniczej w odniesieniu do diody rzeczywistej
- Jakiego rodzaju diodę (o jakich krytycznych parametrach) stosuje się do prostowników sieciowych przeznaczonych do pracy z napięciem 3x400 V.
- Omówić zasadę budowy i działania złącza p-n
- Przebiegi prądów i napięć w wybranych układów prostownikowych (jedno- i dwu-pulsowych)
- Omówić właściwości dynamiczne diod
- Podać różnice pomiędzy diodami prostowniczymi a diodami krzemowymi
- Podać przykłady zastosowania diod
- Omówić działanie stabilizatora z wykorzystaniem diodą Zenera
- Wyjaśnić zjawisko przebicia lawinowego
- Czym jest prąd nasycenia diody

Odpowiedzi na pytania znajdują się w rozdziale 1.1.