

### III. DIODA ZENERA

**Cel ćwiczenia:** Zapoznanie się z zasadą działania diody Zenera, wyznaczenie jej charakterystyki statycznej oraz podstawowych parametrów, tj.: napięcia Zenera, rezystancji statycznej / dynamicznej etc.

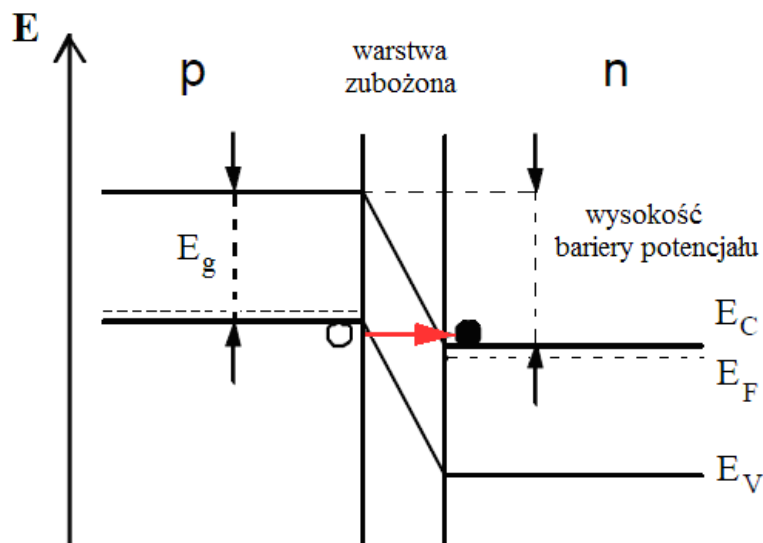
**Zagadnienia:** złącze  $p-n$ , dioda Zenera, charakterystyka prądowo-napięciowa diody Zenera, dioda tunelowa.

#### 1. Wprowadzenie

Diodami Zenera nazywamy diody przeznaczone do zastosowań w układach stabilizacji napięć, w układach ograniczników, jako źródła napięć odniesienia itp.

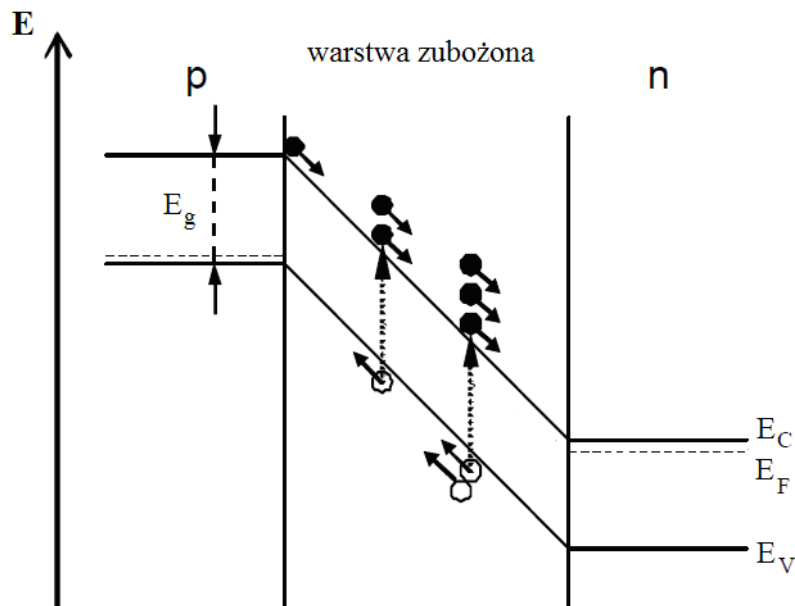
Za działanie diody Zenera odpowiedzialne są dwa podstawowe mechanizmy powodujące przebicie złącza  $p-n$ . Jest to **zjawisko Zenera** (przebiecie Zenera) i **zjawisko powielania lawinowego nośników** (przebiecie lawinowe). Przebicciem złącza  $p-n$  nazywamy zjawisko gwałtownego wzrostu prądu przy polaryzacji złącza w kierunku zaporowym napięciem większym niż pewna charakterystyczna dla niego wartość, nazywana napięciem Zenera ( $U_Z$ ).

Zjawisko Zenera występuje w złączach półprzewodnikowych  $p-n$  silnie domieszkowanych, gdzie w cienkim obszarze warstwy zubożonej złącza  $p-n$  występuje silne pole elektryczne ( $\sim 10^8$  V/m), które może powodować wyrwanie elektronu z wiązania kowalencyjnego atomów w sieci krystalicznej. W rezultacie zerwania wiązania atomów powstaje para nośników elektron-dziura. Posługując się energetycznym modelem pasmowym złącza  $p-n$  (por. Rys. 1) wygenerowanie pary elektron-dziura można zinterpretować jako tunelowe przejście elektronu (tzn. bez zmiany energii) z pasma walencyjnego ( $E_V$ ) przez barierę potencjału do pasma przewodnictwa ( $E_C$ ). Prawdopodobieństwo tunelowego „przenikania” elektronów przez barierę energetyczną złącza jest tym większe, im niższa i węższa jest bariera. Rys. 1 przedstawia model pasmowy złącza  $p-n$  z uwzględnieniem efektu Zenera.



**Rys. 1.** Model pasmowy złącza  $p-n$  spolaryzowanego w kierunku zaporowym z uwzględnieniem efektu Zenera. Czerwoną strzałką zaznaczono prąd tunelowy nośników ładunku z pasma walencyjnego ( $E_V$ ) do pasma przewodnictwa ( $E_C$ ).

Przebiecie lawinowe polega na powielaniu nośników ładunku (elektronów / dziur) w obszarze warstwy zubożonej złącza  $p-n$ , w wyniku zderzeń elektronów z atomami sieci krystalicznej (por. Rys. 2). Zjawisko jonizacji zderzeniowej polega na rozerwaniu wiązania kowalencyjnego atomów w sieci krystalicznej wskutek dostarczenia energii przez swobodny nośnik ładunku, rozpędzony w silnym polu elektrycznym. Z kolei, rozerwanie wiązania atomów w sieci krystalicznej powoduje powstanie swobodnego elektronu oraz swobodnej dziury, które poruszając się ruchem przyspieszonym w polu elektrycznym mogą uzyskać energię kinetyczną wystarczającą, by w wyniku zderzenia nastąpiła ponowna generacja pary elektron – dziura. W rezultacie mamy do czynienia z tworzeniem lawiny nośników ładunku (por. Rys. 2). Efekt ten występuje w złączach słabo domieszkowanych, kiedy grubość złącza znacznie przekracza średnią drogę swobodną elektronu, a więc istnieje duże prawdopodobieństwo uzyskania wystarczającej energii kinetycznej przez elektron w polu elektrycznym złącza, aby doszło do jonizacji zderzeniowej. Wzrost liczby nośników unoszonych w polu elektrycznym złącza powoduje wzrost wartości natężenia prądu.

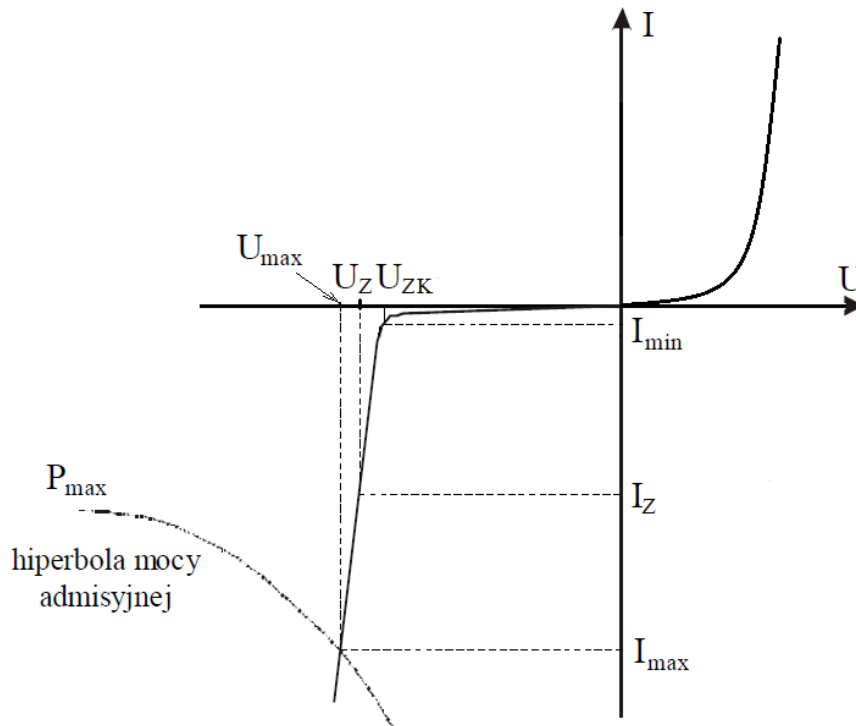


**Rys. 2.** Model pasmowy złącza  $p-n$  spolaryzowanego w kierunku zaporowym z uwzględnieniem mechanizmu powielania lawinowego nośników (elektronów w pasmie przewodnictwa i dziur w pasmie walencyjnym).

Warto tutaj podkreślić, że zarówno przebiecie Zenera, jak i przebiecie lawinowe nie powodują bezpośrednio uszkodzenia złącza. Jeżeli w obwodzie zewnętrznym jest

odpowiednie ograniczenie prądu, to złącze dowolnie długo może pracować w zakresie przebicia. Uszkodzenie następuje wówczas, gdy w skutek braku ograniczenia prądu w złączu generuje się zbyt duża moc i nadmiernie wydzielane ciepło powoduje jego zniszczenie.

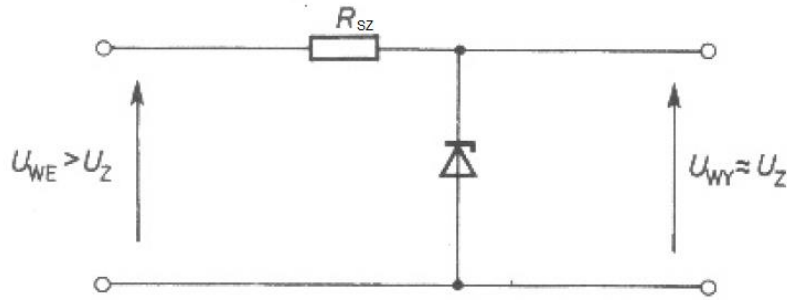
Typowy obszar pracy diody Zenera znajduje się na odcinku charakterystyki prądowo-napięciowej (I-V), odpowiadającemu gwałtownemu wzrostowi prądu wstecznego wskutek zjawiska Zenera lub (i) przebicia lawinowego (por. Rys. 3).



**Rys. 3.** Charakterystyka prądowo-napięciowa (I-V) diody Zenera przy polaryzacji w kierunku zaporowym i przewodzenia wraz z jej podstawowymi parametrami:  $U_Z$  – napięcie Zenera,  $U_{ZK}$  – napięcie progowe,  $I_{min}$  – minimalny prąd wsteczny,  $I_{max}$  – maksymalny prąd wsteczny,  $U_{max}$  – maksymalne napięcie wsteczne,  $P_{max}$  – maksymalna moc.

Podczas polaryzacji w kierunku przewodzenia dioda Zenera zachowuje się tak jak każda dioda, tzn. spadek napięcia na niej jest niewielki i wynosi ok.  $0,6 \div 0,7$  V. Przy polaryzacji zaporowej, dla pewnej wartości napięcia – zależnej od konstrukcji diody (domieszkowania) – następuje gwałtowny wzrost natężenia prądu w kierunku zaporowym przy bardzo niewielkich zmianach napięcia. Tę właściwość wykorzystuje się stosując diodę Zenera jako element stabilizacyjny, tzn. zapewniający prawie stałą wartość napięcia na zaciskach niezależną od natężenia przepływającego prądu. Dla diod silnie domieszkowanych, przy napięciu przebicia w zakresie  $2 \div 5$  V dominuje efekt Zenera, a dla diod słabo domieszkowanych, przy napięciu przebicia powyżej 10V dominuje zjawisko powielania lawinowego. Przebicie Zenera i lawinowe występuje w złączach p-n o średniej koncentracji domieszek, przy napięciach przebicia w zakresie od 5 do 7 V.

Schemat stabilizatora z diodą Zenera przedstawia Rys. 4. Jest to dzielnik napięcia, na którego wyjściu napięcie ( $U_{wy}$ ) jest zawsze zbliżone do napięcia Zenera ( $U_Z$ ), o ile tylko napięcie wejściowe układu ( $U_{we}$ ) jest większe od  $U_Z$ .



**Rys. 4.** Schemat układu zastępczego stabilizatora opartego na diodzie Zenera, gdzie:  $R_{SZ}$  – rezystancja szeregową.

Najważniejszymi parametrami pracy diody Zenera są:

- rezystancja dynamiczna,  $R_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ ;
- rezystancja statyczna,  $R_S = \frac{U_Z}{I_Z}$ ;
- współczynnik stabilizacji, który wyraża stosunek względnej zmiany napięcia wyjściowego do względnej zmiany napięcia wejściowego, czyli:

$$k = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we}} \cdot \frac{U_{we}}{U_{wy}}$$

Znając rezystancję dynamiczną ( $R_Z$ ) diody Zenera oraz zakładając, że  $R_{SZ} \gg R_Z$  można napisać, że  $\frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we}} \approx \frac{R_Z}{R_{SZ}}$  Wstawiając powyższe wyrażenie do wzoru na  $k$  otrzymujemy:

$$k = \frac{R_Z}{R_{SZ}} \cdot \frac{U_{we}}{U_{wy}}$$

Im współczynnik  $k$  ma mniejszą wartość tym lepsza jest stabilizacja układu (typowe wartości:  $k = 0.02 \div 0.05$ ).