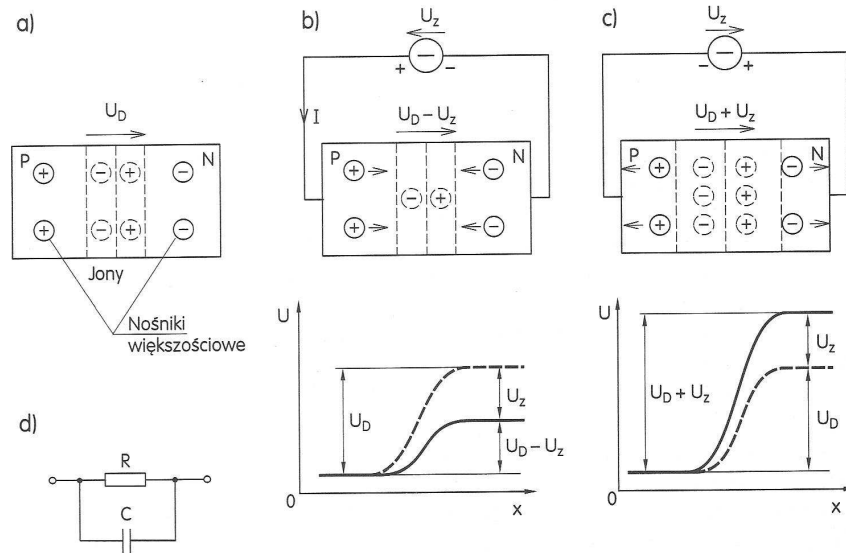


4. Diody półprzewodnikowe

4.1. Właściwości złącza PN

Złącze PN stanowi istotną część składową półprzewodnikowych elementów złączowych. Na rysunku 4.1a przedstawiono schematycznie kryształ półprzewodnika, który z jednej strony zawiera domieszkę donorową (obszar N), a z drugiej domieszkę akceptora (obszar P). Koncentracja elektronów w obszarze N jest znacznie większa niż w obszarze P. Elektrony w obszarze P są tylko nośnikami mniejszościowymi, a koncentracja dziur jest tu większa niż w obszarze N. Wskutek różnicy koncentracji nośniki większościowe dyfundują do obszaru o odwrotnym typie przewodnictwa, gdzie ulegają rekombinacji. W obszarze złącza koncentracja nośników jest ok. milion razy



Rys. 4.1. Złącze PN: a) niespolaryzowane, b) spolaryzowane w kierunku przewodzenia, c) spolaryzowane w kierunku zaporowym, d) schemat zastępczy złącza
 U_D — napięcie dyfuzyjne, U_z — napięcie zasilania

mniejsza niż koncentracja nośników w obszarach przeciwnych. Z tego powodu obszar złącza traktuje się jako pozbawiony nośników i nazywa się obszarem zubożonym lub warstwą zaporową. Różnica potencjałów obszarów typu N i P określa tzw. barierę potencjału nazwaną **napięciem dyfuzyjnym** U_D . Zależy ono od rodzaju monokryształu, koncentracji domieszek i temperatury. W temperaturze pokojowej dla złączy germanowych napięcie U_D wynosi $0,1 \div 0,3$ V, a dla krzemowych $0,6 \div 0,8$ V i maleje ze wzrostem temperatury z szybkością ok. $2,5$ mV/K. Napięcia dyfuzyjne nie można zmierzyć tradycyjnie woltomierzem, ze względu na pojawiającą się siłę elektromotoryczną (sem) na styku metal-półprzewodnik, wskutek czego wskazanie woltomierza jest zerowe.

Doprowadzenie zewnętrznego napięcia do elektrod złącza zakłóca opisany stan równowagi. W zależności od polaryzacji złącza (kierunku doprowadzonego zewnętrznego napięcia) i ze względu na fakt, że w obwodzie zamkniętym suma napięć musi być równa zero (II prawo Kirchhoffa), wartość napięcia bariery potencjału ulega zmianom.

Jeżeli do obszaru N przyłączy się ujemny biegun źródła, a do P dodatni biegun źródła o napięcia U (rys. 4.1b), to rozpocznie się ruch większościowych nośników prądu ku pozbawionemu ich obszarowi złącza, w którym następuje rekombinacja. Proces ten ma charakter ciągły i przez złącze płynie prąd I , ponieważ ujemny biegun źródła stale dostarcza elektrony do obszaru N, a biegun dodatni stale odbiera elektrony z obszaru P, czyli powstają nowe dziury. Przy takiej polaryzacji złącza bariera potencjału obniża się o wartość napięcia U_z , a polaryzację taką nazywa się **polaryzacją w kierunku przewodzenia**.

Jeżeli natomiast do obszaru N przyłączy się dodatni biegun źródła (rys. 4.1c), to większościowe nośniki prądu będą się poruszały w kierunku od złącza, co spowoduje wzrost bariery potencjału o wartość napięcia źródła U_z i zwiększenie rezystancji wewnętrznej złącza. Taką polaryzację nazywa się **polaryzacją w kierunku zaporowym (wstecznym)**. Przez złącze popłynie tylko prąd wsteczny nośników mniejszościowych zależny od temperatury złącza, ponieważ jego główną składową są nośniki prądu generowane pod wpływem ciepła. W przypadku odpowiednio dużej wartości napięcia wstecznego nośniki mniejszościowe uzyskują znaczną energię i przy zderzeniach z atomami wyzwalały kolejne nośniki. Są one znowu przyspieszane i mogą wygenerować kolejne nośniki. Proces zachodzi lawinowo, co objawia się zwiększeniem prądu jonizacji lawinowej. Napięcie wsteczne, przy którym występuje gwałtowny wzrost prądu, nazywa się **napięciem przebicia**. Najczęściej wzrasta wówczas temperatura złącza, co powoduje jego trwałe uszkodzenie.

Do potrzeb analizy układów elektronicznych jest wprowadzany schemat zastępczy złącza PN, odzwierciedlający jego właściwości fizyczne (rys. 4.1d). Zmiany ładunku wywołane zmianami napięcia zewnętrznego są interpretowane jako pojemność złącza C , a R reprezentuje jego rezystancję.

Elementem zawierającym pojedyncze złącze PN jest **dioda półprzewodnikowa**. Diody dzieli się na: prostownicze — do prostowania prądu zmiennego, stabilizacyjne — w układach stabilizacji napięć, sygnałowe — do pracy w układach przetwarzania sygnałów elektrycznych oraz specjalne.

Dawniej diody były wykonywane z selenu i germanu, obecnie najczęściej z krzemu. Diody germanowe, ze względu na niskie napięcie przewodzenia, dwukrotnie

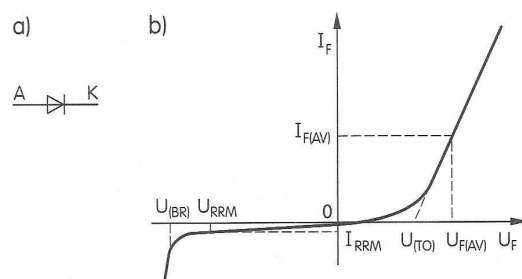
niższe niż w diodach krzemowych, nadal są stosowane w układach specjalnych. Jednak diody krzemowe zdominowały elektronikę, są powszechnie stosowane w sieciowych układach prostowniczych, obwodach sygnałowych, fotoogniwach.

4.2. Diody prostownicze

Diody prostownicze są elementami półprzewodnikowymi, pasywnymi o pojedynczym złączu PN, przeznaczonymi przede wszystkim do przekształcania prądu zmiennego w jednokierunkowy prąd pulsujący.

Strzałka w symbolu diody (rys. 4.2a) wskazuje kierunek przepływu prądu przewodzenia. Charakterystykę prądowo-napięciową diody prostowniczej przedstawiono na rys. 4.2b. Podstawowymi parametrami diody prostowniczej są:

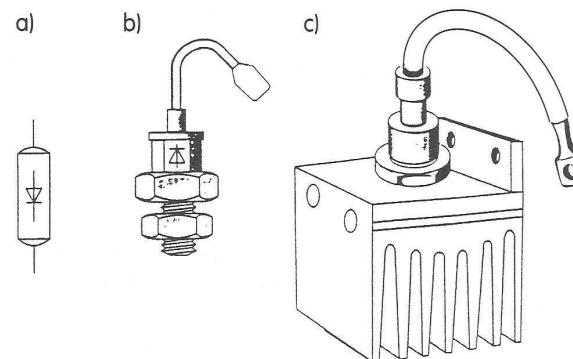
- **dopuszczalne średnie napięcie przewodzenia** $U_{F(AV)}$;
- **dopuszczalny średni prąd przewodzenia** $I_{F(AV)}$, jaki może przepływać przez diodę w kierunku przewodzenia;
- **napięcie progowe** $U_{(TO)}$, wynikające z aproksymacji charakterystyki prądowo-napięciowej; dla diod krzemowych wynosi ono $0,6 \div 0,8$ V, a dla germanowych $0,2 \div 0,3$ V;
- **napięcie przebicia** $U_{(BR)}$;
- **powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne** U_{RRM} , największa wartość napięcia wstecznego, które nie wywołuje uszkodzenia lub zmiany właściwości diody, przyjmowana jako $0,8U_{(BR)}$.



Rys. 4.2. Dioda: a) symbol, b) charakterystyka prądowo-napięciowa

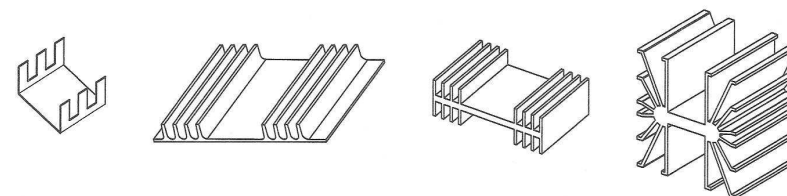
Maksymalne dopuszczalne straty mocy diody prostowniczej, w danej temperaturze otoczenia (najczęściej 25°C), określa parametr $P_{\text{tot max}}$. Ze względu na jego wartość diody prostownicze dzieli się na:

- małej mocy, $P_{\text{tot max}} \leq 1$ W (rys. 4.3a);
- średniej mocy, $1 \text{ W} \leq P_{\text{tot max}} \leq 10$ W (rys. 4.3b);
- dużej mocy, $P_{\text{tot max}} > 10$ W (rys. 4.3c).



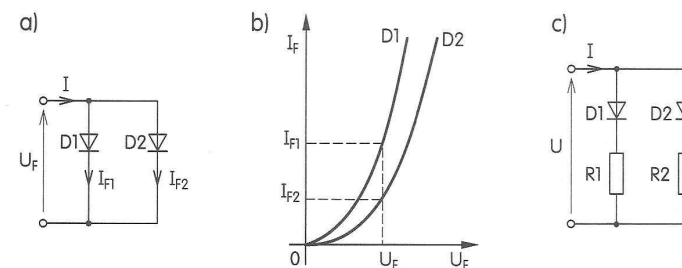
Rys. 4.3. Dioda prostownicza:
a) małej mocy,
b) średniej mocy,
c) dużej mocy

Diody krzemowe mają korzystniejsze parametry w porównaniu z germanowymi. Gęstość prądu w diodach krzemowych może być dwukrotnie większa, a napięcie robocze czterokrotnie wyższe, przy mniejszych wymiarach. Dopuszczalna temperatura złącza krzemowego wynosi ok. 430 K i jest wyższa niż dla złącza germanowych. Diody prostownicze dużej mocy, w celu ograniczenia ich temperatury pracy, wyposaża się w radiatory, a niekiedy dodatkowo chłodzi wymuszonym obiegiem powietrza.



Rys. 4.4. Przykładowe kształty radiatorów

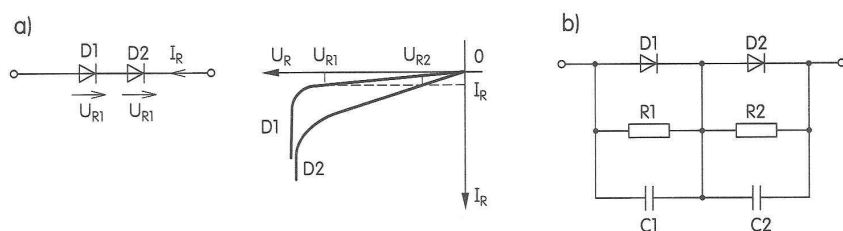
Na rysunku 4.4 przedstawiono przykładowe kształty radiatorów. Ich rozbudowana powierzchnia ma na celu intensywniejsze oddawanie ciepła i tym samym obniżenie temperatury pracy diody. Generalnie, wzrost temperatury pracy wszystkich półprzewodników powoduje zmiany parametrów tych elementów, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Dlatego inne elementy półprzewodnikowe, w których wydzielą się znaczna moc, także umieszcza się na radiatorach.



Rys. 4.5. Połączenie równoległe diod: a) diody o różnej obciążalności, b) charakterystyki prądowo-napięciowe c) schemat układu z rezystorami wyrównującymi rozpyły prądów

Zwiększenie obciążalności prądowej uzyskuje się w wyniku równoległego połączenia dwóch lub więcej diod prostowniczych (rys. 4.5). Tak łączone diody powinny mieć identyczne charakterystyki prądowo-napięciowe w kierunku przewodzenia, aby były obciążone symetrycznie. Wymaga to uprzedniej selekcji diod, co nie jest takie proste. Częściej stosuje się więc układy rezystorowe wyrównujące rozptył prądów, jak pokazano na rys. 4.5c.

Analogicznie, w celu zwiększenia dopuszczalnego napięcia wstecznego stosuje się szeregowe łączenie diod. To z kolei wymaga identycznych charakterystyk prądowo-napięciowych w kierunku zaporowym. W przeciwnym razie może dojść do znacznych różnic w rozkładzie napięcia na poszczególnych diodach (rys. 4.6a). Wymagane jest wówczas zastosowanie układów wyrównujących rozkład napięcia, np. dzielników rezystancyjno-pojemnościowych (rys. 4.6b).



Rys. 4.6. Połączenie szeregowe diod: a) rozkład napięć na diodach o różniących się charakterystykach, b) schemat układu wyrównującego rozkład napięć

I_R, U_R – prąd i napięcie w kierunku wstecznym

4.3. Diody stabilizacyjne

Dioda stabilizacyjna, zwana także **diodą Zenera**, jest tak skonstruowaną diodą krzemową silnie domieszkowaną, że do pracy wykorzystuje się część jej charakterystyki w kierunku zaporowym.

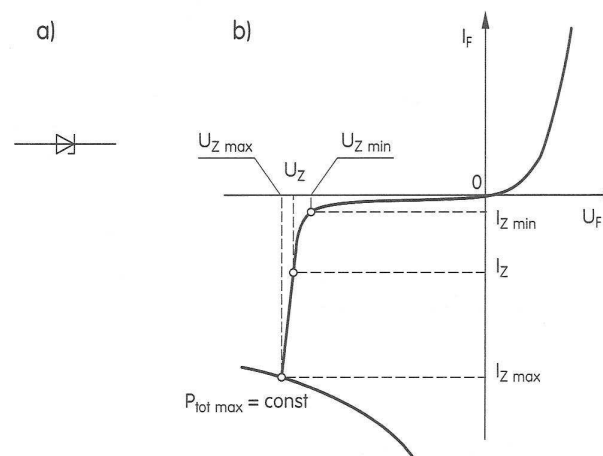
Napięcie wsteczne U_Z , przy którym następuje gwałtowne zakrzywienie charakterystyki prądowo-napięciowej diody, nazywa się **napięciem Zenera** (rys. 4.7). Zależy ono od rezystywności użytego półprzewodnika. Może wynosić 2 ÷ 400 V dla różnych typów diod i w zakresie $I_{min} ÷ I_{max}$ praktycznie nie zależy od prądu przepływającego przez diodę. Stosując diodę Zenera, należy pamiętać o wykonaniu w jej obwodzie odpowiedniego ogranicznika prądu. Przy braku takiego zabezpieczenia w złączu diody mogą powstać duże straty mocy, powodujące wzrost temperatury i zniszczenie złącza.

Podobnie jak diody prostownicze także i diody Zenera dzieli się na: małej ($P_{tot max} \leq 1$ W), średniej (1 W $< P_{tot max} \leq 10$) i dużej mocy ($P_{tot max} > 10$ W).

Parametrem charakteryzującym właściwości stabilizujące diody jest **współczynnik stabilizacji S**, wyrażający się stosunkiem względnych zmian prądu płynącego przez diodę do wywołanych przez nie względnych zmian spadku napięcia na diodzie:

$$S = \frac{\frac{\Delta I_Z}{I_Z}}{\frac{\Delta U_Z}{U_Z}} \quad (4.1)$$

Im większa jest wartość współczynnika S, tym lepsza jest dioda. Dla typowych krzemowych diod stabilizacyjnych wartość współczynnika stabilizacji wynosi ok. 100. Diody Zenera są stosowane głównie do stabilizacji napięcia stałego.



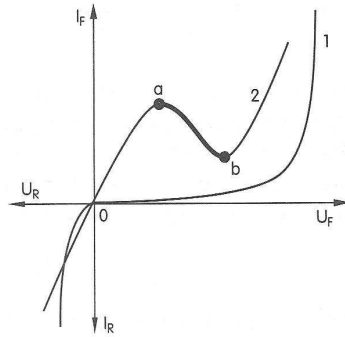
Rys. 4.7. Dioda Zenera: a) symbol, b) charakterystyka prądowo-napięciowa

Elementy i układy elektroniczne często wymagają ochrony przed skutkami stanów niestabilnych, wywołujących chwilowy wzrost napięcia ponad wartość dopuszczalną dla danego układu, czyli tzw. **przebiegnię**. Do ochrony przepięciowej są stosowane (oprócz warystorów) diody Zenera i specjalne diody lawinowe jedno- lub dwukierunkowe. Mają one następujące właściwości:

- bardzo krótki czas zadziałania;
- duży zakres mocy (600 ÷ 1500 W);
- stabilną w dłuższym okresie charakterystykę ograniczania napięcia;
- w przypadku pojawienia się napięcia przekraczającego dopuszczalną wytrzymałość zabezpieczanego układu, nie następuje przerwanie pracy, ale krótkotrwałe zwarcie odprowadzenie doziemne fali przepięciowej.

4.4. Diody sygnałowe i specjalne

Diody sygnałowe i diody detekcyjne są stosowane w układach detekcji sygnałów* wielkiej częstotliwości. Przykładem jest **dioda zwrotna** (wsteczna), której charakterystykę prądowo-napięciową przedstawiono na rys. 4.8. W kierunku zaporowym płynie duży prąd, natomiast w kierunku przewodzenia, początkowo — dla małych wartości napięcia jest niewielki, a po przekroczeniu określonej wartości progowej — gwałtownie wzrasta.



Rys. 4.8. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody

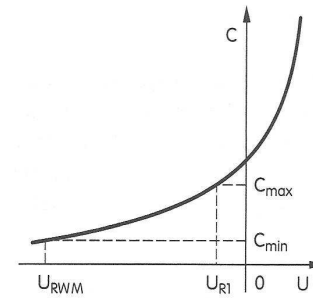
1 — dioda zwrotna, 2 — dioda tunelowa,
 I_R , U_R — odpowiednio prąd i napięcie
 w kierunku wstecznym

Do tej grupy diod zalicza się również **diody impulsowe**, zwane też przełączającymi, stosowane w układach cyfrowych, charakteryzujące się krótkim procesem przejścia ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego. Przykładem jest **dioda Schottky'ego**, charakteryzująca się dużą stabilnością i niezawodnością, małym prądem wstecznym, a przede wszystkim małą bezwładnością, pozwalającą na przełączanie (przechodzenie w stan przewodzenia) w czasie krótszym niż 0,1 ns. Wykorzystuje się w nich właściwości prostownicze złącza metal-półprzewodnik. Napięcie progowe diody Schottky'ego jest mniejsze niż zwykłej krzemowej diody prostowniczej i wynosi $U_{(TO)} = 0,2 \div 0,4$ V. Diody Schottky'ego mają zastosowanie w układach logicznych i w energoelektronice.

Dioda tunelowa jest wykonana z silnie domieszkowanego półprzewodnika, o niewielkiej szerokości złącza. Nie wykazuje ona właściwości zaporowych. Jej charakterystyka prądowo-napięciowa (2) jest pokazana na rys. 4.8. Na charakterystyce diody $I = f(U)$ spolaryzowanej w kierunku przewodzenia występują dwa punkty ekstremalne a i b , w zakresie których przy wzroście napięcia prąd maleje. Oznacza to, że zależność $r = \Delta U / \Delta I$, zwana **rezystancją dynamiczną**, ma wartość ujemną. Dzięki tej właściwości diody tunelowe znalazły zastosowanie w układach generatorów drgań i w układach przełączających.

Pośród diod specjalnych należy wymienić **diodę pojemnościową**, charakteryzującą się zmienną pojemnością w zależności od doprowadzonego napięcia (rys. 4.9). Pojemność każdego złącza PN jest jego charakterystyczną cechą, lecz w diodach pojemnościowych, dzięki odpowiedniemu domieszkowaniu, cechę tę wyeksponowano

* Detekcja sygnałów – wykrywanie informacji w sygnałach elektrycznych uprzednio celowo zdeformowanych.



Rys. 4.9. Charakterystyka $C = f(U)$ diody pojemnościowej

U_{RWM} – maksymalne napięcie wsteczne,
 C_{max} – pojemność określona przy minimalnym napięciu, C_{min} – pojemność określona przy maksymalnym napięciu

szczególnie. Występuje w nich większe niż w innych diodach opóźnienie w ustalaniu się warunków pracy statecznej związane z tzw. pojemnością dyfuzyjną złącza.

Parametrem diody, która pracuje przy polaryzacji w kierunku zaporowym, jest pojemność jej złącza przy określonym napięciu wstecznym (spotykane wartości $C = 0,5 \div 66$ pF) oraz współczynnik

$$k_C = \frac{C_{max}}{C_{min}} \quad (4.2)$$

gdzie: C_{max} – pojemność przy napięciu U_{R1} bliskim zero, C_{min} – pojemność przy maksymalnym napięciu wstecznym U_{RWM} .

Ze względu na małe wymiary, dużą wytrzymałość na udary napięciowe i mały wpływ temperatury na zmiany pojemności, diody pojemnościowe mogą zastępować kondensatory zmienne. Ze względu na zastosowania wyróżnia się dwa rodzaje diod pojemnościowych: warikapy i waraktory. **Warikapy** są używane jako zmienne pojemności w układach automatycznego przestrajania obwodów rezonansowych (strojenia układów o wielkiej i bardzo wielkiej częstotliwości). **Waraktory** są diodami pojemnościowymi stosowanymi jako zmienne reaktancje, zmieniające parametry układów, np. we wzmacniaczach parametrycznych i parametrycznych powielaczach częstotliwości.

Pytania kontrolne

1. Omów właściwości złącza PN.
2. Wyjaśnij, na czym polega polaryzacja złącza w kierunku przewodzenia.
3. Dokonaj klasyfikacji diod.
4. Wyjaśnij działanie diody prostowniczej na podstawie jej charakterystyki prądowo-napięciowej.
5. Podaj i omów podstawowe parametry diody prostowniczej.
6. Wyjaśnij zasadę działania diody Zenera.
7. Jakim parametrem są charakteryzowane właściwości stabilizacyjne diody Zenera?
8. Wymień poznane rodzaje diod sygnałowych.
9. Wyjaśnij działanie diody tunelowej. Podaj jej zastosowania.
10. Co to jest dioda pojemnościowa? Podaj jej zastosowania.