

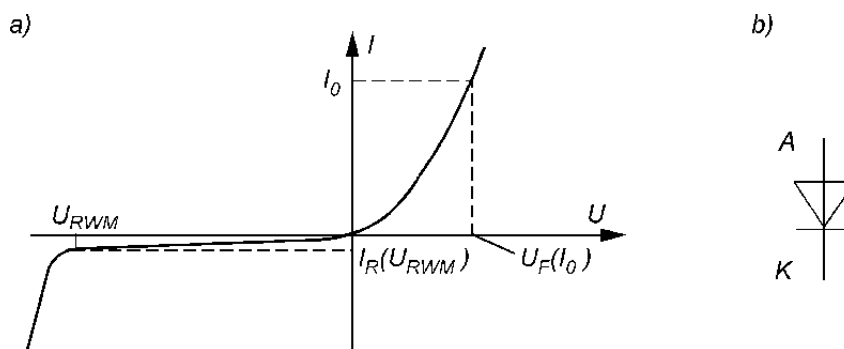
4. DIODY

4.1. WSTĘP

Diody nazywamy element dwukońcówkowy składający się z bryły półprzewodnika mającego złącze p-n, zamknięty w obudowie z wyprowadzeniami elektrycznymi osobno z obszaru typu p i obszaru typu n.

4.2. DIODY PROSTOWNICZE

Diodami prostowniczymi nazywamy diody przeznaczone do prostowania prądu przemiennego. Zjawisko prostowania polega na przepuszczaniu przez diodę prądu w jednym kierunku, wtedy gdy chwilowa polaryzacja diody jest w kierunku przewodzenia, i nieprzepuszczaniu prądu, gdy chwilowa polaryzacja diody jest zaporowa. Polaryzacja w kierunku przewodzenia występuje, gdy na anodzie diody napięcie jest wyższe niż na katodzie (rys. 4.1). Polaryzacja w kierunku zaporowym ma miejsce, gdy rozkład napięć jest odwrotny.



Rys.4.1. a) Charakterystyka prądowo-napięciowa diody prostowniczej z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi, b) symbol diody prostowniczej; A-anoda, K-katoda

Diody prostownicze pracują od małej częstotliwości, tj. od 50 Hz (energetyczna sieć przemysłowa) do kilkudziesięciu kHz (przetwornice tranzystorowe). Charakterystykę prądowo-napięciową diody z zaznaczeniem punktów charakterystycznych przedstawiono na rys. 4.1.

Najistotniejsze parametry graniczne diod prostowniczych to

- napięcie przewodzenia U_F przy określonym prądzie przewodzenia I_F lub przy maksymalnym prądzie wyprostowanym I_0 (dokładnie przy maksymalnej wartości średniej tego prądu),
- prąd wsteczny I_R przy szczytowym napięciu wstecznym U_{RWM} .

Parametry diod są określane dla temperatury otoczenia $T_a=25^{\circ}\text{C}$. Jednak w trakcie użytkowania dioda prostownicza grzeje się. Osiągana temperatura pracy zależy od wielkości jej obciążenia prądowego i od zastosowanego systemu chłodzenia. Najczęściej do odprowadzania ciepła stosuje się mniej lub bardziej rozbudowane radiatory. Dla oceny bilansu cieplnego pracującej w określonych warunkach diody prostowniczej istotnym parametrem jest rezystancja cieplna R_{th} . Znajomość rezystancji cieplnej oraz dopuszczalnej temperatury złącza umożliwia wyznaczenie maksymalnej mocy admysyjnej (rozproszonej) w diodzie, albowiem:

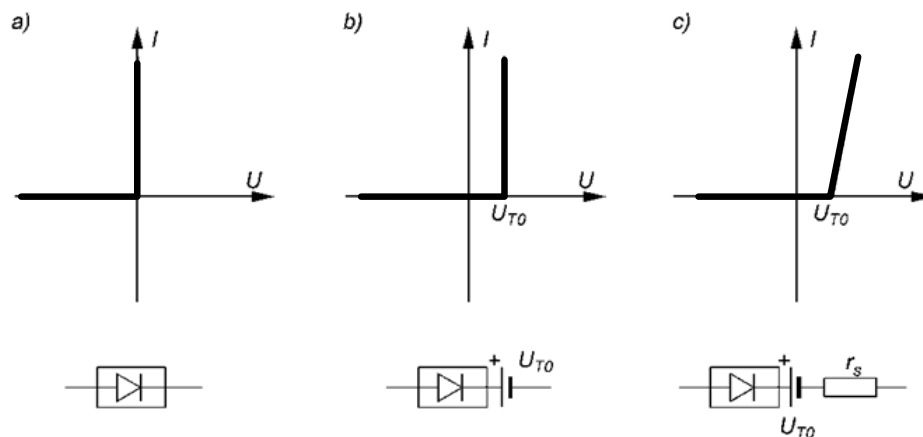
$$P_a = \frac{T_j - T_a}{R_{th}} \quad (4.1)$$

gdzie: T_j - temperatura złącza, T_a - temperatura otoczenia.

Ze względu na moc admisyjną diody dzieli się na:

- małej mocy: $P_a < 1W$,
- średniej mocy: $1W < P_a < 10W$,
- dużej mocy: $P_a > 10W$

Diody na prąd powyżej 10A są mocowane na radiatorach (najczęściej aluminiowych) odprowadzających wydzielane ciepło do otoczenia. Im większą moc pobiera dioda, tym większy musi być radiator. W przypadku bardzo dużych mocy stosuje się chłodzenie radiatora wymuszonym przepływem powietrza lub cieczy chłodzącej.



Rys. 4.2. Modele diody odcinkami liniowymi: a) dioda idealna – dla wyróżnienia symbol diody umieszczono w prostokątnej ramce, b) model z uwzględnieniem napięcia progowego, c) model z uwzględnieniem napięcia progowego i rezystancji szeregowej

Można aproksymować charakterystyki diod prostowniczych stosując model odcinkowo liniowy. Na rysunku 4.2 przedstawiono kolejne przybliżenia nieliniowej charakterystyki diody modelami liniowymi. Najprostsze przybliżenie jest to tzw. *dioda idealna* (rys.4.2a), tj. taka, która ma zerowy prąd w kierunku zaporowym i zerowy spadek napięcia w kierunku przewodzenia. Dioda taka w rzeczywistości nie istnieje, ale jest modelem wyidealizowanym przyjmowanym w pewnych sytuacjach dla uproszczenia szacunkowych obliczeń inżynierskich układów prostowniczych. W dokładniejszym modelu (rys.4.2b) uwzględniono źródło szeregowe reprezentujące napięcie progowe U_{T0} (0,6-0,7 V dla diod krzemowych). Najdokładniejszy jest model trzeci (rys. 4.2c), w którym uwzględnia się skończoną wartość rezystancji szeregowej r_s . Rezystancję szeregową diody stanowią rezystancje obszarów półprzewodnika poza złączem p-n, rezystancje styków półprzewodnika z wyprowadzeniami i rezystancje wyprowadzeń. W modelu diody powoduje to pochylenie odcinka przybliżającego jej charakterystykę w obszarze przewodzenia.

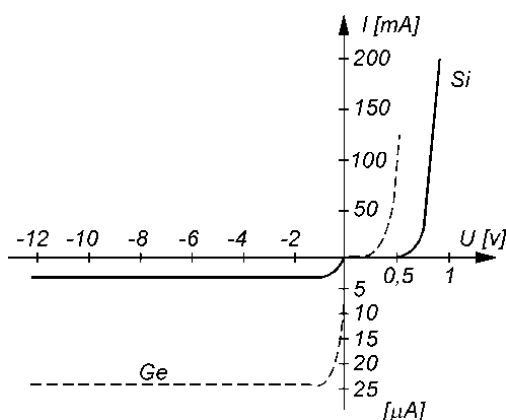
Typowymi zastosowaniami diod prostowniczych w układach elektronicznych są układy prostowników napięcia przemiennego.

4.3. DIODY UNIWERSALNE

Diody uniwersalne są to diody germanowe i krzemowe charakteryzujące się niewielkim zakresem napięć (do 100 V) i prądów (do 100 mA) oraz częstotliwością pracy ograniczoną do kilkudziesięciu

megaherców. Przeznaczone są głównie do stosowania w układach detekcyjnych i prostowniczych małej mocy.

Porównanie charakterystyk diod germanowych i krzemowych przedstawiono na rys. 4.3. Symbol graficzny diody uniwersalnej jest taki sam, jak diody prostowniczej (rys. 4.1b).



Rys.4.3. Porównanie charakterystyk diody krzemowej (linia ciągła) i germanowej (linia przerywana). Uwaga: nieciągłość skali na obu osiach

Diody germanowe mają niższe napięcie progowe (0,2 - 0,3 V) niż diody krzemowe (0,6 - 0,7 V). Dlatego w zakresie polaryzacji w kierunku przewodzenia ich charakterystyka jest bardziej zbliżona do charakterystyki diody idealnej. Natomiast przy polaryzacji w kierunku zaporowym dioda krzemowa ma mniejszy prąd nasycenia, przez co jest lepszym przybliżeniem diody idealnej.

W grupie parametrów charakteryzujących diody uniwersalne wyróżnia się parametry statyczne i dynamiczne.

Parametry statyczne:

- napięcie przewodzenia U_F przy określonym prądzie przewodzenia I_F ;
- prąd wsteczny I_R przy określonym napięciu wstecznym U_R .

Parametry dynamiczne:

- pojemność diody przy określonej częstotliwości i określonym napięciu wstecznym (najczęściej $C < 1\text{pF}$ dla $f = 10,7\text{ MHz}$ i $U_R = 1\text{ V}$),
- sprawność detekcji η , tj. stosunek mocy sygnału zdemodulowanego do mocy sygnału wejściowego w.cz. (parametr podawany dla diod przeznaczonych do stosowania w układach detekcyjnych).

Wyróżnia się następujące dopuszczalne parametry graniczne:

- maksymalny stały prąd przewodzenia $I_{F\text{max}}$,
- maksymalny szczytowy prąd przewodzenia $I_{FM\text{max}}$,
- maksymalne stałe napięcie wsteczne $U_{R\text{max}}$,
- maksymalne szczytowe napięcie wsteczne $U_{RM\text{max}}$,

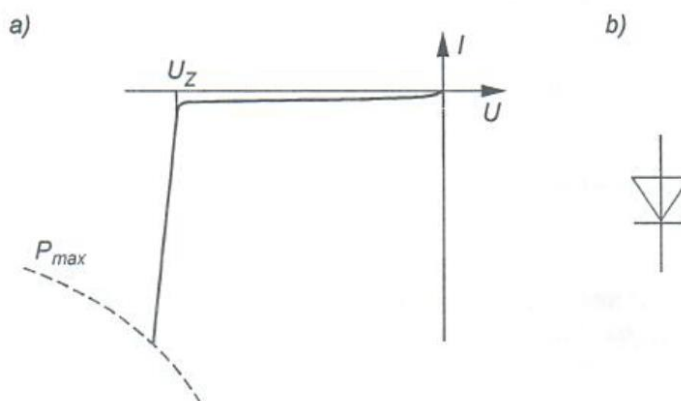
Ponadto podaje się dopuszczalną temperaturę złącza T_j (zwykle 75°C dla diod germanowych oraz ok. 150°C dla diod krzemowych).

4.4. DIODY ZENERA

Diody Zenera są to diody półprzewodnikowe, których typowy obszar pracy znajduje się na odcinku

charakterystyki prądowo-napięciowej, w którym następuje gwałtowny wzrost prądu przy polaryzacji zaporowej.

Diody Zenera zwane są też diodami stabilizacyjnymi, stabilitronami lub stabilistorami. Przeznaczone są do stosowania w układach stabilizacji napięć, układach ograniczników lub jako źródło napięć odniesienia. Symbol graficzny diody Zenera przedstawiono na rys. 4.5b.



Rys. 4.5. a) Charakterystyka prądowo napięciowa diody Zenera (zakres zaporowy i przebicia), b) symbol graficzny diody Zenera

Gwałtowny wzrost prądu przy polaryzacji zaporowej diody (rys. 4.5a) może nastąpić wskutek zjawiska Zenera lub/i zjawiska lawinowej jonizacji zderzeniowej. Oba mechanizmy prowadzące do gwałtownego wzrostu prądu w obszarze przebicia. Przebiecie Zenera następuje w złączach silnie domieszkowanych i dla tych diod gwałtowny wzrost prądu następuje przy napięciu polaryzacji zaporowej do 5 V. Przebiecie lawinowe występuje w złączach słabiej domieszkowanych i wtedy gwałtowny wzrost prądu następuje przy napięciu polaryzacji zaporowej powyżej 7 V. W złączach o średniej koncentracji domieszek wzrost prądu następuje przy napięciu 5 - 7 V z zakresu polaryzacji zaporowej i wtedy występują oba zjawiska jednocześnie.

Jak widać, nazwa *dioda Zenera* nie jest całkiem adekwatna do charakteru zjawisk zachodzących we wnętrzu tej diody, gdyż wzrost prądu nie musi być związany jedynie ze zjawiskiem Zenera. Jednak tradycyjnie przyjęło się, że termin *dioda Zenera* obejmuje swym znaczeniem zarówno diody o przebieciu Zenera, lawinowym i takim gdzie przebiecie lawinowe i Zenera występuje jednocześnie.

W grupie parametrów charakterystycznych diody Zenera wyróżnia się:

- napięcie Zenera (napięcie stabilizacji) U_Z definiowane zwykle jako napięcie na diodzie przy prądzie stabilizacji równym dziesiątej części maksymalnego prądu stabilizacji (lub napięcie odpowiadające umownej wartości prądu stabilizacji);
- temperaturowy współczynnik napięcia Zenera (napięcia stabilizacji) TKU_Z definiowany wzorem

$$TKU_Z = \frac{1}{U_Z} \frac{dU_Z}{dT} \Big|_{I_Z = \text{const}} \quad (4.2)$$

który wyraża stosunek względnej zmiany napięcia stabilizacji dU_Z/U_Z do bezwzględnej zmiany temperatury dT przy określonym prądzie stabilizacji a podawany jest w $1/^\circ\text{C}$ lub $\%/^\circ\text{C}$;

- rezystancję dynamiczną

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (4.3)$$

która charakteryzuje nachylenie charakterystyki statycznej w zakresie przebicia;

- maksymalną moc strat $P_{\text{max}} = U_Z I_{Z\text{max}}$ określającą przebieg hiperboli mocy admisyjnej (rys.4.5).

Wartość maksymalnej mocy strat wynika z możliwości odprowadzenia określonej ilości ciepła przez diodę i podawana jest dla temperatury otoczenia 25°C.

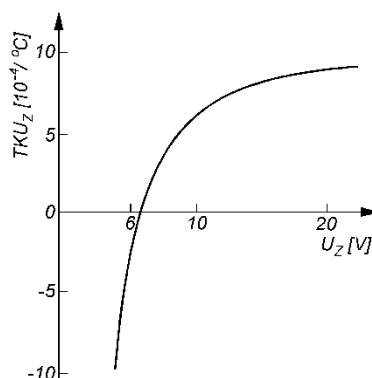
Szerszego komentarza wymagają dwa bardzo ważne parametry, tj. temperaturowy współczynnik napięcia Zenera i rezystancja dynamiczna.

Temperaturowy współczynnik napięcia Zenera TKU_Z przyjmuje wartości:

- ujemne dla diod, w których gwałtowny wzrost prądu jest spowodowany zjawiskiem Zenera ($U_Z < 5V$);
- dodatnie dla diod, w których występuje zjawisko powielania lawinowego ($U_Z > 7V$);
- bliskie zera dla diod w których $U_Z = 5 \div 7V$, gdzie oba zjawiska występują jednocześnie.

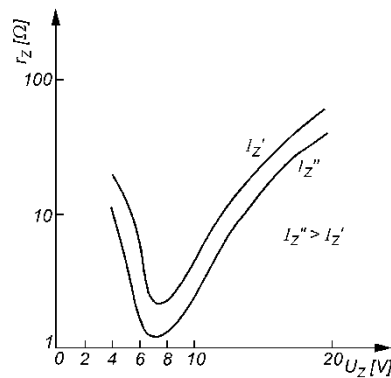
Przedstawiono to na rysunku 4.6.

Bliski zera i zerowy dryft temperaturowy dla diod stabilizacyjnych o $U_Z = 5 \div 7V$ jest ich bardzo cenną właściwością. Jak łatwo się domyślić, wynika on z wzajemnie kompensującego się wpływu obu zjawisk towarzyszących gwałtownemu wzrostowi prądu. Jest to jeden z bardzo nielicznych przypadków w dziedzinie budowy przyrządów półprzewodnikowych, gdzie można stwierdzić, że parametr charakteryzujący przyrząd nie zależy lub bardzo niewiele zależy od temperatury. Ma to istotne znaczenie przy zastosowaniu diod Zenera jako źródeł napięć wzorcowych (napięć odniesienia inaczej referencyjnych) w przyrządach pomiarowych, stabilizatorach itd.



Rys. 4.6. Zależność współczynnika TKU_Z dla diod o różnych napięciach Zenera

Rezystancja dynamiczna diody zależy od wartości napięcia Zenera diody i prądu stabilizacji, tj. od punktu pracy diody (rys. 4.7). Minimum rezystancji dynamicznej obserwuje się dla napięcia 6-8 V, tj. w diodach, w których wzrost prądu w zakresie przebicia następuje na skutek łącznego działania zjawiska lawinowej jonizacji zderzeniowej i Zenera. Im mniejsza rezystancja dynamiczna, tym bardziej stroma jest charakterystyka prądowo - napięciowa w zakresie przebicia, a zatem następują mniejsze zmiany napięcia stabilizacji w funkcji zmian prądu. Przemawia to również na korzyść diod o napięciu Zenera z zakresu ok. 6 V, gdzie zarówno wartości rezystancji dynamicznej, jak i wcześniej wspomniane właściwości temperaturowe preferują je do stosowania w układach elektronicznych.

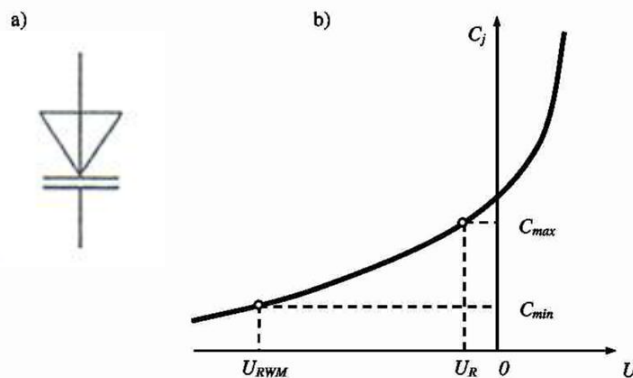


Rys. 4.7. Zależność rezystancji dynamicznej r_Z od napięcia Zenera U_Z dla dwóch wartości prądu stabilizacji

Bardzo dobrą stabilność temperaturową uzyskuje się też w tzw. stabilizatorach skompensowanych, zbudowanych w taki sposób, że w obudowie znajduje się dioda Zenera o napięciu U_Z powyżej 6 V (o przebiciu lawinowym) połączona szeregowo ze złączem pracującym w kierunku przewodzenia. W tym przypadku dodatni współczynnik TK_{U_Z} diody Zenera o przebiciu lawinowym jest kompensowany przez ujemny dryft temperaturowy charakterystyki diody pracującej w kierunku przewodzenia (ok. $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$). Przy odpowiednim doborze obu diod można uzyskać $TK_{U_Z} < 10^{-5}/^\circ\text{C}$.

4.5. DIODY POJEMNOŚCIOWE

Diody pojemnościowe są to diody, w których wykorzystuje się zjawisko zmian pojemności warstwy zaporowej złącza p-n pod wpływem polaryzacji w kierunku zaporowym. Pojemność bariery jest właściwością charakterystyczną każdego złącza p-n. Jednak dioda ta ma konstrukcję optymalizowaną pod kątem swych zastosowań. Symbol graficzny diody pojemnościowej i jej charakterystykę pojemnościowo-napięciową przedstawiono na rys. 4.8.



Rys. 4.8. Symbol graficzny diody pojemnościowej (a) i jej charakterystyka pojemnościowo-napięciowa

Wybrane parametry charakterystyczne tego typu diody to:

- pojemność złącza C_{max} przy napięciu wstecznym U_R (zwykle przy napięciu bliskim zera woltów, czyli jest to pojemność maksymalna),
- pojemność złącza C_{min} przy maksymalnym napięciu wstecznym U_{RWM} (czyli jest to pojemność minimalna),
- stosunek pojemności C_{max} do C_{min} zwany współczynnikiem przestrajania K ($K = C_{max}/C_{min}$).

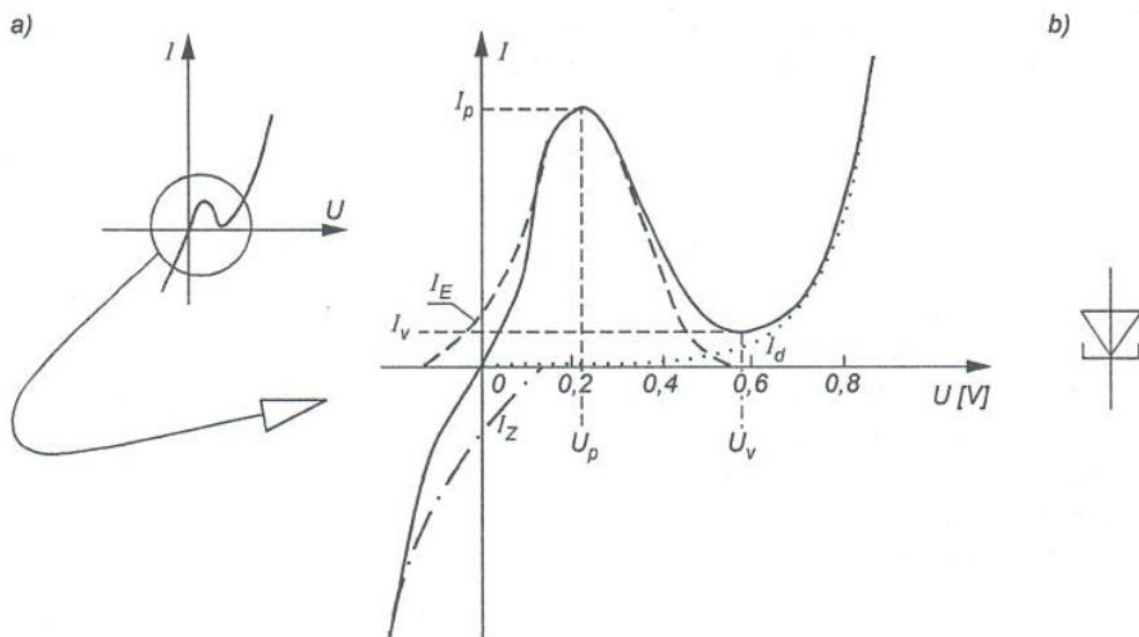
Diody pojemnościowe jako przyrządy, których pojemność zmienia się pod wpływem

przyłożonego napięcia, stosuje się np. do sterowania napięciowego częstotliwością rezonansową obwodu elektrycznego i do budowy generatorów przestrajanych napięciowo. Znajdują one szerokie zastosowania w radiotechnice, np. w generatorach o regulowanej częstotliwości, nadajnikach z modulacją częstotliwości, układach automatycznego dostrojenia.

4.6. DIODY TUNELOWE

Diody tunelowe są to diody, których charakterystyka prądowo-napięciowa przy polaryzacji w kierunku przewodzenia ma odcinek o ujemnej rezystancji dynamicznej (rys. 4.9).

Diody te mają silnie domieszkowane złącze p-n. W takich złączach warstwa zaporowa jest bardzo cienka (ok. 10 nm); natężenie pola elektrycznego w niej jest bardzo duże. W tych warunkach istnieje jednakowe prawdopodobieństwo przejścia elektronu z pasma podstawowego do pasma przewodnictwa (prąd Zenera I_Z) i odwrotnie (prąd Esakiego¹ I_E). W stanie równowagi przy braku polaryzacji złącza prąd Zenera jest równy prądowi Esakiego, zatem $I_Z + I_E = 0$. Przy polaryzacji zaporowej prąd Zenera przeważa nad prądem Esakiego. Przy polaryzacji w kierunku przewodzenia prąd Esakiego w początkowym zakresie dominuje osiągając największą wartość w punkcie wierzchołka o współrzędnych (I_p, U_p) . Następnie prąd Esakiego maleje, a jednocześnie rośnie prąd dyfuzyjny nośników większościowych. Osiągany jest punkt doliny o współrzędnych (I_v, U_v) . Charakterystycznym parametrem diody tunelowej jest stosunek I_p/I_v .



Rys. 4.9. a) Charakterystyka prądowo napięciowa diody tunelowej (linia ciągła) i charakterystyki trzech prądów składowych: I_Z - prąd Zenera, I_E - prąd Esakiego, I_d - prąd dyfuzji nośników większościowych; b) symbol graficzny diody

Wypadkowa charakterystyka napięciowo-prądowa diody tunelowej jest superpozycją trzech przebiegów, tj. charakterystyk $I_Z(U)$, $I_E(U)$ i $I_d(U)$. Najbardziej interesujący jej odcinek to ten, w którym napięcie na diodzie rośnie, a prąd przez nią płynący maleje. Jest to odcinek o ujemnej

¹ Leo Esaki, profesor Uniwersytetu w Osace (Japonia) jako pierwszy dostrzegł możliwość przepływu tunelowego elektronów z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego. Laureat Nagrody Nobla z 1973 r.

rezystancji dynamicznej. W przybliżeniu minimalna wartość tej rezystancji wynosi:

$$r_{d(\min)} \approx -2 \frac{U_p}{I_p} \quad (4.4)$$

lub średnio:

$$r_{d(\text{sr})} = \frac{U_v - U_p}{I_v - I_p} \quad (4.5)$$

Ujemny zakres rezystancji dynamicznej diody tunelowej oraz mała bezwładność zjawisk tunelowych predestynuje tę diodę do zastosowań w generatorach pracujących w zakresie bardzo wysokich częstotliwości, rzędu gigaherców.

4.7. DIODY SCHOTTKY'EGO

Diody Schottky'ego są to diody, w których wykorzystuje się właściwości prostujące złącza metal-półprzewodnik (m-s). Okazuje się bowiem, że odpowiednio dobrany materiał półprzewodnikowy i odpowiednio dobrany metal sąsiadując ze sobą mogą utworzyć złącze o charakterystyce prądowo-napięciowej podobnej do charakterystyki klasycznego złącza otrzymywanego w wyniku sąsiadujących ze sobą w jednej bryle półprzewodnika obszaru typu n i obszaru typu p.

Symbol graficzny diody Schottky'ego przedstawiono na rys. 4.10.



Rys. 4.10. Symbol graficzny diody Schottky'ego

Diody te charakteryzują się mniejszym spadkiem napięcia w kierunku przewodzenia. Dla złącza krzemowego p-n wynosi ono 0,7 V, a dla złącza metal-półprzewodnik znacznie mniej bo 0,4-0,5 V.

Ponadto, z powodu natychmiastowego odprowadzania nośników wstrzykniętych z półprzewodnika do metalu nie występuje w tych diodach pojemność dyfuzyjna ponieważ w metalu nie występuje zjawisko magazynowania nośników. Jest to okoliczność bardzo korzystna, gdyż umożliwia pracę diody Schottky'ego w zakresie bardzo wielkich częstotliwości.

4.8. FOTODIODY

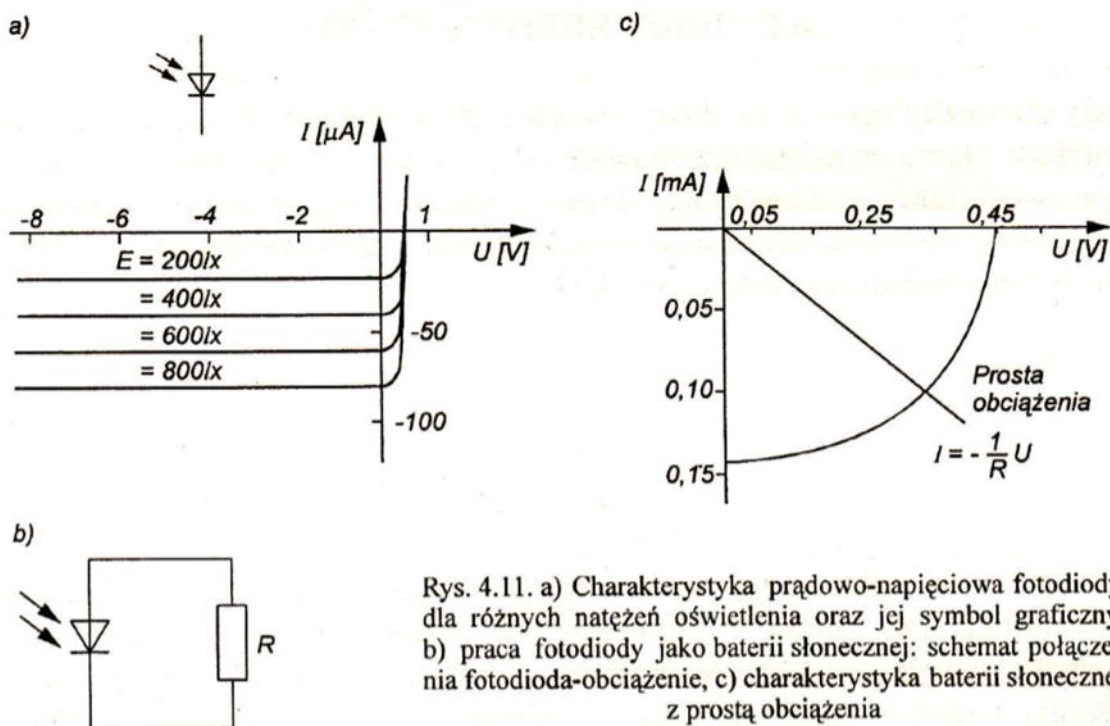
Fotodiody jest to dioda półprzewodnikowa, której parametry elektryczne zależą od padającego promieniowania świetlnego. W tym celu umieszczana jest ona w specjalnej obudowie z przezroczystym oknem. Charakterystykę prądowo-napięciową fotodiody przedstawiono na rys. 4.11a.

Analizując charakterystykę prądowo-napięciową, rozróżnić w niej można przebiegi w różnych ćwiartkach układu współrzędnych. Przebieg charakterystyki w trzeciej ćwiartce obrazuje wykorzystane fotodiody jako czujnika oświetlenia. Przy polaryzacji wstecznej złącza bez oświetlenia jego powierzchni płynie tzw. prąd ciemny fotodiody. Odpowiada on prądowi nasycenia złącza p-n.

Jeśli na złącze pada promieniowanie świetlne, powoduje ono dostarczenie energii do złącza, w

wyniku czego następuje generacja par elektron-dziura. Zjawisko to można traktować jako wstrzykiwanie nośników mniejszościowych przez promieniowanie świetlne. Prąd płynący przez złącze jest wtedy sumą dwóch składowych: prądu nasycenia (prądu ciemnego) i prądu proporcjonalnego do natężenia oświetlenia.

Charakterystyka diody w czwartej ćwiartce układu współrzędnych ilustruje jej pracę jako przetwornika promieniowania świetlnego, inaczej baterii słonecznej.



Jeśli oświetlona fotodiody jest rozwarta (nie płynie przez nią prąd), to wielkość napięcia powstałego na jej zaciskach nazywamy **napięciem fotowoltaicznym**. Dla krzemu napięcie fotowoltaiczne wynosi około 0,5 V

Mechanizm powstania tego napięcia jest następujący: Wysokość bariery potencjału przy nie oświetlonej diodzie półprzewodnikowej jest taka, aby wypadkowy prąd złącza był równy zeru (równowaga dynamiczna prądów - prąd unoszenia równy prądowi dyfuzji). Jeśli na złącze pada promieniowanie świetlne, następuje wstrzykiwanie nośników mniejszościowych, a tym samym wzrost prądu tych nośników. Ponieważ obwód jest rozwarty, to całkowity prąd musi być równy zeru. Zatem musi nastąpić równoważący wzrost prądu nośników większościowych w takim samym stopniu, w jakim wzrósł prąd nośników mniejszościowych. Może to nastąpić, gdy bariera potencjału na złączu hamująca ten proces zostanie obniżona. Na zaciskach oświetlonej diody pojawi się zatem napięcie równe wartości obniżenia bariery potencjału, zwane jak już wspomniano, napięciem fotowoltaicznym. Gdy fotodiody zostanie odciążona odbiornikiem w jego obwodzie popłynie prąd.

Baterie słoneczne są szeroko wykorzystywane do zasilania wyposażenia elektrycznego urządzeń satelitarnych oraz ładowania klasycznych baterii wtedy, gdy warunki świetlne są korzystne. Wtedy to fotodiody pracują obciążone odbiornikami (rys. 4.11b, c), a punkt pracy jest określony miejscem przecięcia prostej obciążenia i charakterystyki prądowo-napięciowej diody dla aktualnej wartości natężenia oświetlenia.

Sprawność przetwarzania energii świetlnej przez fotodiody jest niewielka i wynosi ok. 14%.

4.9. DIODY ELEKTROLUMINESCENCYJNE

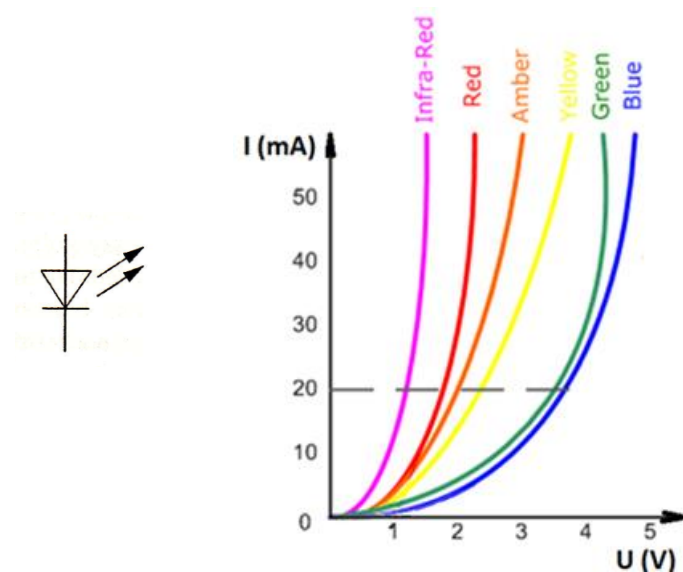
Diody elektroluminescencyjne, zwane też diodami LED (*Light Emitting Diode*), emitują promieniowanie świetlne, gdy przepływa przez nie prąd przewodzenia.

W trakcie przepływu prądu przez złącze spolaryzowane w kierunku przewodzenia następuje proces rekombinacji² elektronów i dziur z wydzieleniem pewnej porcji energii. W krzemie energia ta przekazywana jest do sieci krystalicznej półprzewodnika nagrzewając kryształ. W innych półprzewodnikach, np. takich jak arsenek galu (GaAs), energia ta wydziela się w postaci promieniowania świetlnego (fotonów). Wystarczy zatem, że obszar złącza jest osłonięty materiałem przepuszczającym promieniowanie świetlne, aby dioda taka mogła służyć jako wskaźnik świetlny.

W trakcie procesu rekombinacji zwrot energii następuje w postaci promieniowania o długości fali zależnej od szerokości pasma zabronionego. Szerokość pasma zabronionego jest natomiast cechą określonego rodzaju półprzewodnika. Można zatem stwierdzić, że o barwie emitowanego światła decyduje materiał półprzewodnikowy użyty do budowy diody, np. dioda na podczerwień jest zbudowana z arsenku galu, dioda emitująca światło czerwone z arseno-fosforu galu, a zielone z fosforu galu.

Natężenie promieniowania diody zależy od wartości prądu przewodzenia. Już przy prądzie kilku mA widoczne jest świecenie, a znamionowe 20 mA prądu zasilania daje świecenie wyraźne.

Charakterystyka prądowo-napięciowa diody elektroluminescencyjnej ma kształt charakterystyki złącza p-n. Jednakże napięcia przebicia tych diod są niewielkie (kilka woltów), a spadki napięcia w kierunku przewodzenia (gdy dioda świeci) zależą od zastosowanego materiału półprzewodnikowego i mieszczą się w granicach 1,3-5 V (rys.4.12).

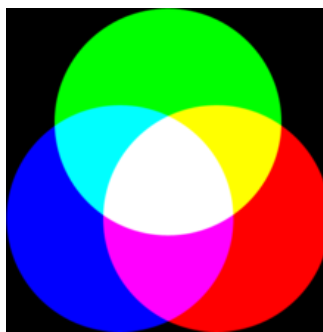


Rys.4.12. Symbol graficzny i przykładowe charakterystyki prądowo - napięciowe diod LED dla różnych barw emitowanego światła

Jak wyżej wspomniano częstotliwość promieniowania a więc i barwa światła zależy od szerokości przerwy zabronionej materiału półprzewodnikowego. Cechą charakterystyczną diody zbudowanej z określonego materiału jest otrzymywana konkretna barwa światła. Światło białe jako

²⁾ Rekombinacja jest to przejście elektronu z pasma przewodnictwa do pasma walencyjnego. Na skutek rekombinacji przestaje istnieć para elektron-dziura.

złożone z kilku barw (rys.4.13) nie może być otrzymywane bezpośrednio jako wynik procesu rekombinacji w obszarze złącza pojedynczej diody.

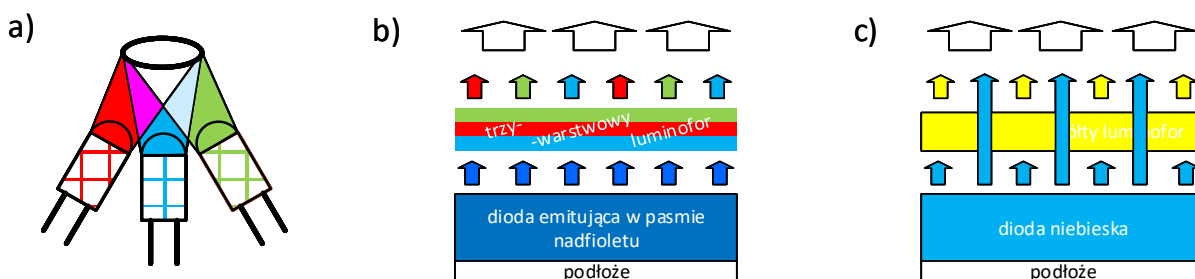


Rys.4.13. Addytywne mieszanie barw podstawowych (czerwonej, zielonej i niebieskiej) powodujące powstawanie barw dopełniających oraz barwy białej

Istnieją trzy sposoby wytwarzania światła białego przy wykorzystaniu diod LED.

Pierwszy polega na mieszaniu w odpowiednich proporcjach trzech podstawowych barw światła pochodzących z diody czerwonej, zielonej i niebieskiej RGB (*Red, Green, Blue*) (rys.4.14.a). W metodzie tej najczęściej umieszcza się w jednej obudowie trzy chipy LED tworzące diodę trójkolorową a postrzeganą przez obserwatora jako jeden punkt świetlny światła białego.

Jest to rozwiązanie o dużej wydajności posiadające możliwości w zakresie elastycznego sterowania parametrami otrzymywanego światła białego. Wadą tej metody jest wysoki koszt i skomplikowana konstrukcja układu zasilającego - sterującego, ponieważ każda z diod wymaga osobnego układu zasilającego, ustalającego odpowiedni punkt pracy.



Rys.4.14. Sposoby otrzymywania światła białego z wykorzystaniem diod LED; a) RGB (*Red, Green, Blue*) mieszanie światła o barwach podstawowych z trzech różnych diod, b) konwersja światła, c) metoda hybrydowa

Drugim sposobem jest konwersja światła (konwersja długości fali) z wykorzystaniem luminoforu, którym pokrywa się diodę promieniującą w paśmie nadfioletu. Luminofor pokrywający chip diody składa się z trzech warstw, z których każda realizuje konwersję światła ultrafioletowego na jedną z trzech barw podstawowych. W wyniku tego procesu następuje wymieszanie się barw i w efekcie otrzymujemy kolor biały (rys.4.14b).

Metoda ta jest prostsza niż mieszanie trzech barw z trzech różnych diod, ale jednocześnie jest mniej wydajna. Jest ona mało efektywna energetycznie ze względu na straty światła w luminoforze.

Trzeci sposobem jest metoda hybrydowa, która jest połączeniem elementów dwóch pierwszych omówionych sposobów. Zastosowano wzbudzenie żółtego luminoforu (a więc luminoforu o barwie dopełniającej) przy pomocy światła diody niebieskiej stanowiącego barwę podstawową. Światło

niebieskie jest częściowo przepuszczane, a częściowo pochłaniane przez luminofor, który z kolei konwertuje jego część na światło o barwie żółtej. Dokonuje się mieszanie barw niebieskiej i żółtej, co w efekcie daje barwę białą.

Uzyskana w ten sposób dioda charakteryzuje się prostotą wykonania i prostym obwodem zasilania. Wadą jest jednak problem utrzymaniem stałości parametrów luminoforu w czasie.